Agradecimentos

Quero agradecer a todos que colaboraram e me apoiaram nesta fase da minha vida, por isso mesmo agradeço, em especial:

Às minhas orientadoras, Dr.ª Filomena Soares e Dr.ª Celina Leão, pela atenção ajuda e disponibilidade que demonstraram.

A meus pais, Graça e Manuel, pelo incentivo e pela força que sempre demonstraram nos meus estudos e em tudo o resto.

Ao meu amigo e parceiro de dissertação, Luís, pois sempre nos apoiamos e ajudamos mutuamente.

À minha namorada, Susete, que me apoia constantemente e tem paciência mesmo quando não estou nos melhores dias.

A todos eles fica aqui registado o meu agradecimento.

Resumo

O objectivo desta dissertação consiste no desenvolvimento de um simulador de processos, em particular do controlo de nível de água e de temperatura num reservatório. Este simulador foi desenvolvido tendo como base o kit didáctico experimental, Process Rig. Este kit implementa os dois processos de controlo segundo determinadas especificações.

Na indústria actual existem vários processos onde está presente o aquecimento ou o controlo de nível de um líquido. Assim, o simulador foi desenvolvido no sentido de testar e determinar o tipo de controlo mais adequado para estes processos.

O simulador foi desenvolvido em LabVIEW. Para controlar este processo utilizaram-se diferentes algoritmos de controlo, entre eles, o controlador On/Off e Proporcional-Integral-Derivativo. Estão, também, disponíveis para teste, diversos métodos numéricos, entre os quais, os métodos de Euler, Runge-Kutta 4ª ordem e Runge-Kutta Fehlberg. A disponibilização destes métodos numéricos justifica-se pela necessidade de concretizar a sua aplicação a problemas de controlo. Prevê-se o funcionamento do sistema em malha aberta e malha. O utilizador pode alterar os parâmetros característicos do sistema, do controlo e dos métodos numéricos em análise, visualizando graficamente o seu efeito.

De modo a fazer o enquadramento do trabalho proposto, foi efectuada uma pesquisa bibliográfica, onde foi realizado um estudo sobre simuladores já existentes. Para definir o funcionamento do processo foram deduzidas as equações dos modelos matemáticos do processo, controlo de nível e de temperatura. De modo a integrar este passos anteriores foi desenvolvido um interface, num ambiente amigável para o utilizador. Para se poder ter uma explicação rápida sobre qualquer dúvida, foi criado um suporte teórico disponível no simulador. Desenvolveu-se um manual de utilização, onde se explica o funcionamento detalhado de todo este processo. Foram realizados diversos testes funcionais ao simulador, encontrando-se neste momento em condições de ser disponibilizado como ferramenta de ensino de controlo de processos bem como na Unidade de Curricular de Matemática Aplicada no Mestrado Integrado em Engenharia Electrónica Industrial e Computadores como exemplo de aplicação de métodos numéricos a problemas de engenharia.

Abstract

The objective of this dissertation is the development of a process simulator, in particular the control of the water level and temperature in a tank. This simulator has been developed on the basis of the experimental teaching kit, Process Rig. This kit implements the two processes control under proper specifications.

In industry today there are several cases where the heating or the level control the level of a liquid are presented. Thus, the simulator has been developed to test and determine the most appropriate type of control for these processes.

The simulator was developed in LabVIEW. To control these processes different control algorithms, were used namely: the On / Off controller and the Proportional - Integral - Derivative. There are also available for testing, various numerical methods Euler, Runge - Kutta 4 th order and Runge - Kutta Fehlberg. The availability of these numerical methods are justified by the need to fulfill their application to control problems. The system can operate in closed and open loop. The user can change the parameters of the system, of the control and of the numerical methods in analysis, viewing graphically their purpose.

To give a brief overview of the work, a search was carried out in order to identify existing simulators. To define the process operation the equations of the mathematical models were presented for the control level and temperature. In order to integrate the previous steps, an interface was developed, in a friendly environment. A theoretical support is available in the simulator. A manual for the user, where the operation of the whole process, is explained in detail. Several functional tests were performed in order to prove the use of this simulator as a tool for teaching. It can be used in processe control studies and in the Curriculum Unit of Applied Mathematics from Integrated Masters in Electronics and Computers, as an example of an application of the numerical methods in solving engineering problems.

Índice

Índice das figuras

Índice das tabelas

1. Introdução

Neste capítulo apresentam-se os objectivos da dissertação, bem como a motivação para a realização do projecto. Faz-se uma referência breve a simuladores disponíveis na Internet. Por último, apresenta-se a estruturação da dissertação.

1.1. Enquadramento e motivação

Esta dissertação de mestrado insere-se num projecto de investigação desenvolvido pelos departamentos de Electrónica Industrial e de Produção de Sistemas da Universidade do Minho.

Tem sido preocupação dos docentes envolvidos, desenvolver ferramentas de ensino na área de controlo de processos e resolução de equações diferenciais, que possibilitem aos alunos um estudo “amigável” funcionando como um complemento do ensino presencial. A interligação destes dois temas num mesmo projecto, surge da necessidade de sensibilizar os alunos de engenharia para a aplicação dos métodos numéricos na resolução de problemas práticos e reais, em particular, na área de controlo.

Este trabalho foi realizado para desenvolver o controlo de um processo que pode ser bastante útil na indústria, uma vez que em inúmeros processos é necessário o controlo do nível de água ou de temperatura. Existem já vários trabalhos desenvolvidos com simuladores para controlo de nível e temperatura. Este trabalho surge de modo a interligar estes dois processos.

1.2. Objectivos

O objectivo deste trabalho é desenvolver um simulador de processos, reservatório de água, no qual se controla o nível de água e temperatura. Este processo é uma réplica virtual do kit didáctico experimental Process Rig [1] ,[2]. No sistema a desenvolver testaram-se diferentes algoritmos de controlo, entre eles o controlador On/Off e Proporcional-Integral-Derivativo (PID) [3]. Para a simulação dos processos em estudo, e na resolução das equações diferenciais utilizaram-se diversos métodos numéricos, entre os quais os métodos de Euler, Runge-Kutta 4ª ordem e Runge-Kutta Fehlberg [4] .

O programa para a simulação foi desenvolvido LabVIEW [5], onde o utilizador pode, de forma simples e prática, visualizar, testar, controlar e simular, quer gráficamente quer de um modo animado, a variação do nível de água e temperatura no reservatório. Estão, também, disponíveis os conceitos teóricos de suporte ao projecto, relacionados com o sistema de equações diferenciais, assim como os algoritmos de controlo e os métodos numéricos.

1.3. Estado da arte

Na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Maria Teresa Restivo desenvolveu um trabalho de monitorização, detecção e controlo de um nível de água em circuito fechado [6] . Esse sistema é constituído por dois tanques, contendo vários transdutores. A comunicação entre o computador e o sistema é feita através da interface RS232C, e o controlo estabelecido por um Controlador Lógico Programável. O programa de monitorização e simulação foi desenvolvido em LabVIEW. Neste trabalho é possível o utilizador interagir remotamente, estabelecendo as equações de circulação; pode também fazer a selecção das respostas gráficas dos vários transdutores, ou ainda, fazer a alteração dos parâmetros de um controlador PID, observando a resposta gráfica.

Para além deste trabalho, pode-se encontrar diversos simuladores para controlo de nível de tanques de água, como é o caso do trabalho de Dr.Jacob S.Glower – Water Level Control Simulation, sendo que este trabalho foi desenvolvido em Pascal [7].

Relativamente ao controlo de temperatura existem alguns simuladores, como é o caso do trabalho de mestrado de Denis Cerchiaro da Universidade de S.Paulo [8], no qual se faz o controlo da temperatura de um permutador de calor. O objectivo do trabalho é apresentar o desenvolvimento, simulação e resultados práticos de um sistema de controlo de temperatura, para fins biomédicos em que se utilizam soluções aquecidas. O sistema utiliza um permutador de calor projectado para aquecer uma solução que entra no dispositivo a uma temperatura inferior ou igual à do ambiente e sai com o valor programado. A solução é aquecida a partir da água de um reservatório com temperatura controlada. O controlador de temperatura é do tipo proporcional-integral-derivativo (PID) digital e utiliza um microcontrolador para implementação do algoritmo de controlo, da aquisição do sinal dos sensores de temperatura, do comando de actuadores e da interface com o utilizador.

O Process Rig é um kit didáctico onde é implementado controlo do nível de água e de temperatura. Este sistema é constituído por dois tanques, um de armazenamento e outro onde se vai actuar (reservatório). Para o controlo de nível, o funcionamento deste sistema consiste em atingir um determinado nível de água no reservatório, sendo que a água que vai entrar no reservatório vem do tanque de armazenamento. Para o controlo de temperatura, o reservatório depois de encher totalmente, pode ser aquecido ou arrefecido. O aquecimento é feito por uma resistência de aquecimento que se encontra dentro do reservatório; para arrefecer o tanque faz-se passar a água num refrigerador. Com este kit pode-se simular vários problemas de controlo existentes na indústria, uma vez que as suas funcionalidades estão presentes em diversos processos industriais.

O kit didáctico Process Rig, Figura 1 , é composto por:

-Um depósito;

-Uma bomba;

-Um refrigerador;

-Um tanque (reservatório), que contém:

-Um sensor, de nível máximo;

-Uma resistência de aquecimento;

-Um sensor de temperatura;

-Uma ventoinha, para ter uma temperatura constante dentro do tanque;

-Um dreno de segurança, por onde a agua se escoa se estiver demasiado cheio;

-Um dreno manual, para fazer a descarga manual de água.

Figura 1 – Painel real do Process Rig [1]

Na Figura 2, pode-se ver uma descrição mais detalhada dos componentes no painel principal do Process Rig.

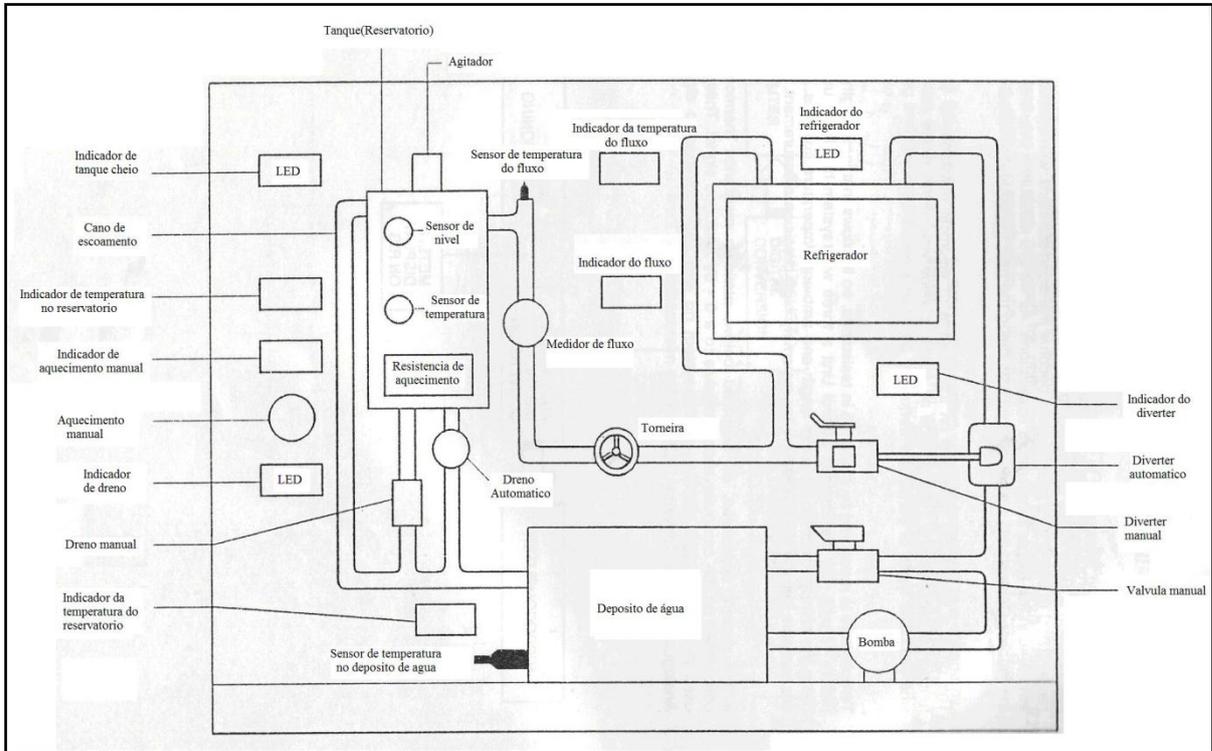



Figura 2 – Painel detalhado do Process Rig [1]

O Process Rig contém um depósito onde está armazenada água. A água quando sai do depósito pode seguir dois caminhos, ir directamente para o tanque ou passar pelo refrigerador. Este caso diz respeito ao processo de arrefecimento da temperatura de água no tanque. No entanto, este arrefecimento nunca é muito eficiente, pois a temperatura do depósito nunca é mais baixa que a temperatura ambiente, uma vez que o refrigerador só funciona com ventilação. Essa direcção é definida pelo "diverter". Para aquecer a água no tanque existe uma resistência no interior do mesmo e um agitador para fazer uma melhor mistura da água proveniente do depósito com a água que já se encontra no interior do tanque. A água só é aquecida quando o tanque estiver completamente cheio, uma vez que é uma das recomendações dos manuais do Process Rig. Existe um sensor de nível para verificar se o tanque se encontra cheio. O tanque é esvaziado por: dreno

manual, dreno automático ou dreno de segurança. O dreno manual funciona como uma torneira, o automático é estabelecido pelo ciclo de controlo e o dreno de segurança serve para casos em que se verifique algum erro ou avaria, isto é, em caso de avaria do sensor de nível máximo. Este kit é também composto por vários “displays” que mostram o fluxo, a temperatura no tanque, a temperatura no reservatório, a temperatura de entrada da água no tanque, e a potência de aquecimento manual. Para além disto há vários “Led´s” que permitem ver se o tanque está cheio, se o “diverter” está ligado, se o dreno automático está em funcionamento e se o refrigerador está a actuar.

1.4. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos: introdução; fundamentos teóricos; trabalho desenvolvido; resultados e por último conclusões e perspectivas futuras.

No primeiro capítulo faz-se uma abordagem ao trabalho proposto, isto é, faz-se uma introdução e o enquadramento do tema na actualidade.

No capítulo dois são abordados os fundamentos teóricos de todos os constituintes deste trabalho, desde malha aberta e malha fechada, métodos numéricos, algoritmos de controlo e o programa LabVIEW.

No terceiro capítulo encontra-se descrito o trabalho desenvolvido, ou seja, o desenvolvimento do simulador, e das suas funcionalidades.

No capítulo quatro estão apresentados os alguns dos resultados obtidos de forma a ilustrar o funcionamento do simulador em diferentes situações.

E, por último, no quinto capítulo estão descritas as conclusões e perspectivas futuras para este simulador.

2. Fundamentos Teóricos

Este capítulo tem como objectivo apresentar os conceitos teóricos de suporte ao desenvolvimento do trabalho. Para tal, vão ser definidos alguns conceitos necessários a este projecto, como malha aberta e malha fechada, os algoritmos de controlo utilizados, On/Off e PID, e também os métodos numéricos implementados, Euler, Runge-Kutta 4ª ordem e Runge-Kutta Fehlberg [9].

2.1.Malha aberta

A definição de malha aberta [10] pode ser descrita como um sistema em que a resposta, ou saída, não actua sobre a entrada desse sistema, como se pode ver na Figura 3.

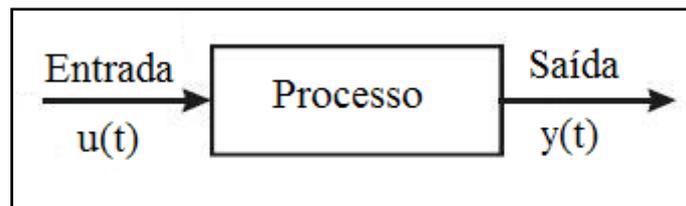



Figura 3 – Sistema em malha aberta

O controlo em malha aberta baseia-se em aplicar um sinal pré-determinado, esperando-se que no fim de um determinado período de tempo a variável controlada atinja um determinado valor ou apresente um determinado comportamento. Neste tipo de sistema de controlo não são utilizadas informações sobre a evolução do processo para a determinar a entrada a ser aplicada num determinado instante. Mais concretamente, a entrada não resulta de uma leitura do sinal de saída. Este tipo de controlo é utilizado no cálculo do lugar das raízes, e não possui realimentação. Este tipo de sistema indica a resposta em regime estacionário, onde o sinal de saída não é utilizado para corrigir o erro, ou seja, para realimentação.

2.2. Malha fechada

Na malha fechada a saída influencia a entrada. Na Figura 4 pode ver-se um exemplo de um sistema em malha fechada, onde se pode observar essa influência da saída sobre a entrada, ou seja, a realimentação.

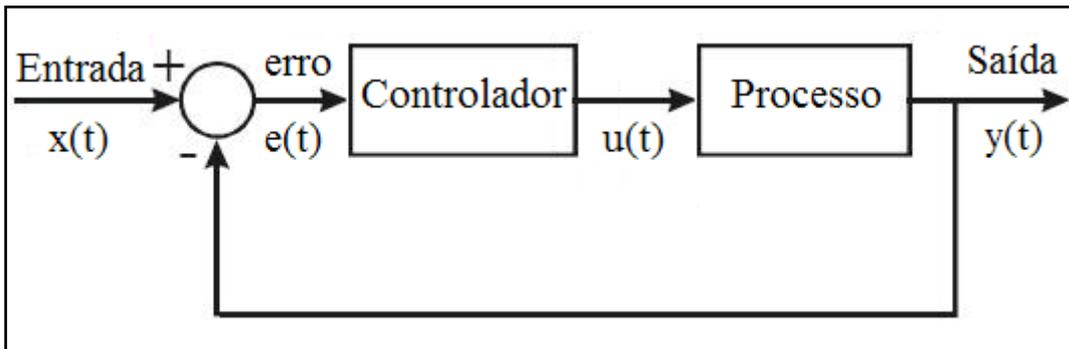



Figura 4 – Sistema em malha fechada

No controlo em malha fechada, informações sobre como a saída está a evoluir são utilizadas para determinar a entrada que deve ser aplicada ao processo num determinado instante. Isto é feito a partir de uma realimentação da saída. Normalmente, com o intuito de tornar o sistema mais preciso e fazer com que ele reaja a perturbações externas, a saída é comparada com um sinal de referência e a diferença entre esses sinais, o erro, é utilizada para determinar a entrada que deve realmente ser aplicada ao processo. Assim, a entrada é estabelecida de forma a corrigir esta diferença entre a saída e o sinal de referência (erro). O dispositivo que utiliza o sinal de erro para determinar ou calcular a entrada a ser aplicada é denominado de controlador.

2.3. Algoritmos de controlo

Os algoritmos de controlo são utilizados de modo a controlar um determinado processo, sendo que os mais utilizados são os On/Off e os PID [11]. O controlador PID combina vários tipos de acções de controlo, proporcional, integral e derivativa.

2.3.1. Controlador On/Off

Os controladores On/Off têm apenas duas formas de funcionamento, ligados ou desligados, não havendo portanto valores intermédios de funcionamento. As vantagens deste controlador são o baixo custo e a simplicidade de funcionamento. Precisamente por estes motivos, são bastante utilizados em aplicações industriais e domésticas. Para não provocar desgaste no controlador introduz-se histerese, que serve para actuar num intervalo maior, ou seja, para o processo ligar/desligar ocorrer menos vezes. Na Figura 5 pode-se ver um exemplo de histerese. Como desvantagens, apresenta baixa precisão e a oscilação da saída.

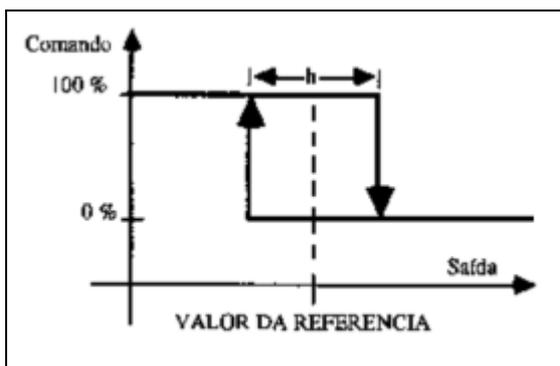



Figura 5 – Exemplo de histerese [10]

2.3.2. Controlador PID

O controlador Proporcional-Integral-Derivativo, ou PID [12], combina os três tipos de acções de controlo, proporcionais, integrais e derivativas. Este controlador beneficia das características particulares de cada um desses controladores de modo a obter uma melhor resposta em regime permanente do sistema.

2.3.2.1. Controlador P

O controlo proporcional pode ser utilizado apenas para controlar processos simples, uma vez que é uma forma de controlo muito simples. Este tipo de controlo consiste no produto da constante proporcional pelo erro, ou seja, quanto maior for a constante proporcional menor será o erro. Este controlador assume um papel importante quando o sinal de erro é grande, sendo a sua acção reduzida com a diminuição desse sinal. Deste efeito resulta o aparecimento de um erro permanente, o que faz com que nunca se elimine completamente o erro.

Na Figura 6 está representado um processo controlado por um controlador deste tipo.

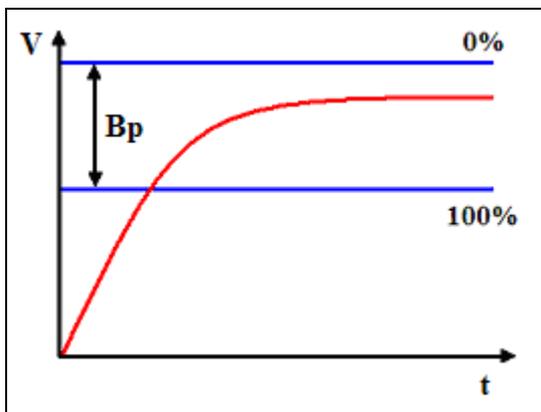



Figura 6 – Exemplo de um controlador do tipo P

O espaço entre as linhas azuis é a banda proporcional, que é a amplitude de banda de referência na qual ocorre a regulação proporcional. Dentro da banda proporcional a potência aplicada ao processo varia entre 0 e 100%, sendo proporcional ao desvio entre a referência e o valor medido no processo (normalmente esta medição é feita por um sensor). Se se tiver uma banda proporcional elevada o processo estabiliza, embora seja muito abaixo da referência; caso a banda proporcional seja reduzida, o processo pode ficar instável, provocando oscilações. Esta acção de controlo é sempre utilizada. A relação entre o ganho proporcional e a banda proporcional está na equação (1).

$$\%BP = \frac{1}{Kp} 100\% \qquad (1)$$

2.3.2.2. Controlador PI

O controlo integral não se pode aplicar a um processo que não tenha controlo proporcional, uma vez que este controlo serve para reduzir e eliminar o erro em regime permanente, causado pelo controlador proporcional. Este controlador serve também para eliminar desvios no decorrer do processo. Na Figura 7 está um exemplo de um processo em que um controlador PI está presente.

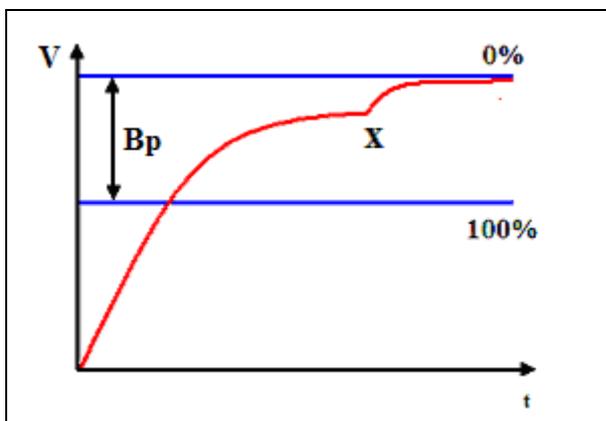



Figura 7 – Exemplo de um controlador PI

Neste exemplo, pode ver-se o controlador PI a actuar. Inicialmente comporta-se como o controlador P, e assim sendo não atinge o valor de referência, devido ao erro em regime permanente. No ponto x a acção integral entra em funcionamento, e deste modo elimina o erro em regime permanente e atinge o valor de referência. A variável que define esta acção de controlo é Ti, ou seja, o tempo integral.

A esta acção de controlo costumam estar associados problemas de instabilidade, para melhorar este aspecto diminui-se o ganho proporcional (Kp).

2.3.2.3. Controlador PD

Como acontece como o controlador PI, o controlador PD não pode ser utilizado sem o controlo proporcional, uma vez que este controlador só actua quando há variações no valor do erro, isto é, se o processo se mantiver estável a sua acção é nula. Este controlador vai evitar as oscilações. Se a banda proporcional for reduzida, é natural que exista sobre-elongamento. Ao aplicar o controlo derivativo vai-se eliminar o sobre-elongamento e também as oscilações. Na Figura 8 e na Figura 9 podem-se visualizar exemplos do mesmo processo, sem controlo PD (Figura 8), e com controlo PD (Figura 9).

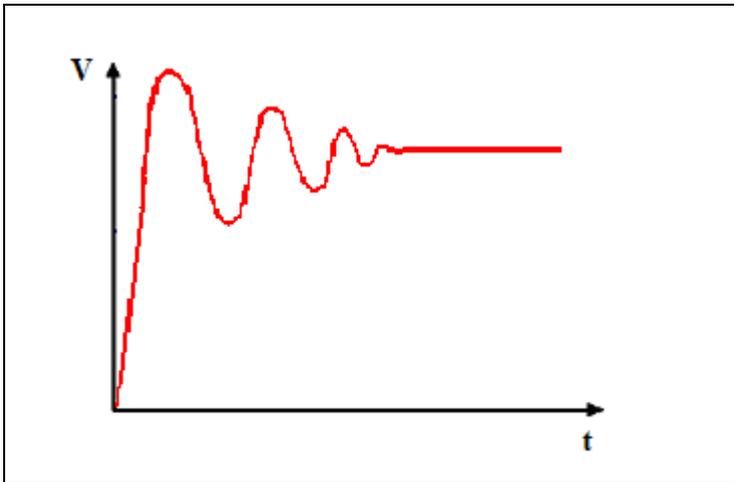



Figura 8 – Exemplo de controlador sem controlo PD

Nesta figura pode-se observar bastantes oscilações até atingir o valor desejado. Esta acção de controlo é responsável por tornar estáveis os sistemas em que esteja aplicada.

Outra característica importante desta acção é a antecipação á resposta, uma vez que se apoia no cálculo da derivada do erro, anulando geralmente a parte oscilatória do controlador integral.

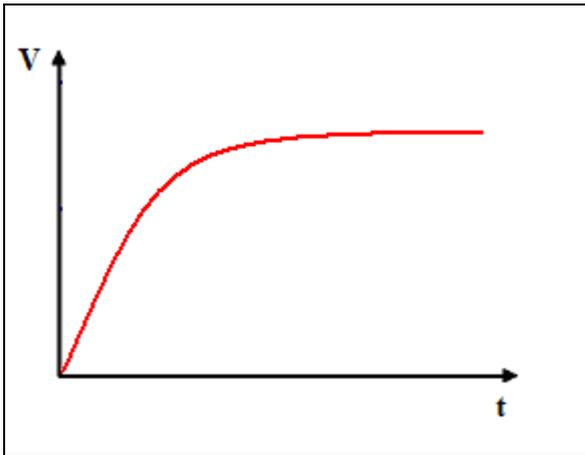



Figura 9 - Exemplo de controlador com controlo PD

Na Figura 9 as oscilações foram eliminadas. A variável que descreve esta acção de controlo é o tempo derivativo, ou Td. O aumento deste valor aumenta a acção derivativa.

Esta acção de controlo melhora frequentemente a resposta do sistema, embora para sistemas que apresentem bastante ruído não seja aconselhada, uma vez que vai aumentar esse sinal.

Controlador PID

O controlador PID surge ao somar os três tipos de acções de controlo, proporcionais, integrais e derivativas. A acção integral é responsável por minimizar o erro em regime permanente, obtendo assim precisão. A acção derivativa actua de modo a eliminar a instabilidade causada pela acção integral. Outra das vantagens do controlador derivativo é tornar a resposta do sistema mais rápida, uma vez que antecipa a resposta.

O PID digital surge através da discretização do PID analógico clássico. Deste modo pode-se utilizar os métodos clássicos para determinar os parâmetros do controlador analógico e aplicá-los ao digital.

A equação matemática (2) define o algoritmo PID.

$$C(t) = Cest + Kp\left(e + \frac{1}{ti}\int e\,dt + td.\frac{de}{dt}\right) \tag{2}$$

Sendo que *C* é a acção de controlo, *e* é o erro (sinal de referência menos medição da variável de saída), o *Kp* é o ganho proporcional do controlador, *ti* é a constante de tempo integral e *td* é a constante de tempo derivativo. *Cest* representa a acção de controlo em regime estacionário. Discretizando a equação (2) com o período de amostragem h obtém-se a equação (3) é relativa ao algoritmo do PID discreto de posição.

$$C(n) = Cest + Kp\left(e_n + \frac{h}{ti}\sum^{n} e_k + \frac{td}{h}(e_n - e_{n-1})\right) \tag{3}$$

Escrevendo a equação (3) para o instante *n-1*, vem:

$$C_{n-1} = Cest + Kp(e_{n-1} + \frac{h}{ti}\sum^{n-1} e_k + \frac{td}{h}(e_{n-1} - e_{n-2})) \tag{4}$$

Para o algoritmo do PID discreto de velocidade tem-se a equação (5), subtraindo a acção de controlo entre dois instantes consecutivos de amostragem.

$$C_n = C_{n-1} + Kp((e_n - e_{n-1}) + \frac{h}{ti}e_n + \frac{td}{h}(e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2})) \tag{5}$$

2.2.3.4. Sintonização do controlador PID

Existem diversos métodos de sintonizar de controladores PID, destacando-se o método de Ziegler-Nichols que pode ser implementado quer para malha aberta, quer para malha fechada.

No primeiro método de sintonização coloca-se o sistema em malha aberta, aplica-se manualmente uma variação em degrau na variável de comando directamente no actuador. Regista-se o sinal de saída que representa normalmente uma curva do tipo S.

Para fazer a sintonização em malha aberta traça-se uma recta tangente no ponto de inflexão da curva, como podemos ver na Figura 10. Determina-se o tempo de atraso, L, e a constante de tempo, T. Este método só deve ser utilizado em curvas de formato semelhante a um S.

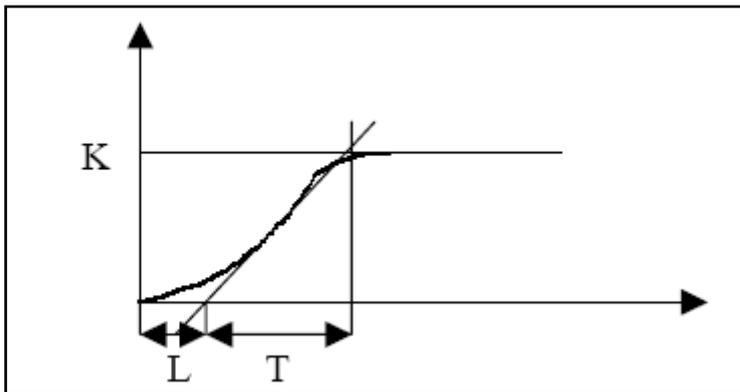



Figura 10 - Sintonização do PID em malha aberta [13]

Depois de calcular os valores de L e de T podemos determinar os valores de Kp, Ti e Td através da tabela 1.

Tabela 1– Método de Ziegler-Nichols em malha aberta

Tipo de controlador	Kp	Ti	Td
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

No segundo método de sintonização em malha fechada, coloca-se o controlador no modo proporcional apenas, aplica-se um degrau temporário na entrada do sistema variável de referência registando a resposta do sistema, aumenta-se sucessivamente ao

ganho do controlador de modo a que se obtenha uma resposta oscilatória com período e amplitudes constantes.

Este valor de ganho do controlador corresponde ao ganho último e o período de oscilação da onda de saída corresponde ao período último.

Com os valores determinados experimentalmente do ganho e período último e consultando a tabela 2 é sintonizado o controlador em estudo.

Tabela 2 - Método de Ziegler-Nichols em malha fechada

Tipo de controlador	Kp	Ti	Td
P	$0.5K_{CR}$	∞	0
PI	$0.45K_{CR}$	$\frac{1}{1.2}P_{CR}$	0
PID	$0.6K_{CR}$	$0.5P_{CR}$	$0.125P_{CR}$

Pretende-se com este método, determinar a frequência de oscilação, o período crítico e obter no máximo 25% de overshoot. Estes valores são estimativas iniciais, afinando-se na prática os valores do ganho e das constantes de tempo do controlador, Kp, Ti e Td.

Para se obter uma melhor compreensão dos efeitos das acções de controlo, proporcionais, integrais e derivativas no desempenho do sistema apresenta-se na Tabela 3, os efeitos das diferentes acções de controlo.

A acção proporcional reduz o erro em regime permanente, mas não o consegue eliminar; é também responsável por uma diminuição no tempo de subida.

A acção integral tem como principal função eliminar o erro em regime permanente, embora também é responsável pelo aumento do sobre-enlongamento e tempo de estabelecimento na resposta transitória.

A função da acção derivativa é diminuir o sobre-enlongamento e o tempo de estabelecimento, ou seja, aumentar a estabilidade e deste modo vai-se melhorar a resposta transitória.

Para se poder ter uma ideia da utilização das diferentes acções de controlo na indústria, em 1990 [3] estimava-se que 20% dos controladores eram somente proporcionais (P), 60% eram proporcionais integrais (PI) e os restantes 20% combinavam as acções proporcionais, integrais e derivativas (PID).

Tabela 3 – Efeito das acções de controlo, proporcionais, integrais e derivativas sobre os parâmetros de sistemas [10]

	Tempo de subida	Sobre-enlongamento	Tempo de estabelecimento	Erro
Kp	Diminui	Aumenta	Não tem efeito	Diminui
Ti	Diminui	Aumenta	Aumenta	Elimina
Td	Não tem efeito	Diminui	Diminui	Não tem efeito

2.4.Métodos numéricos

As equações diferenciais ordinárias são uma forma essencial para modelizar diversos sistemas físicos, como reacções químicas, pêndulos, circuitos electrónicos (resistências, capacitâncias ou indutâncias), flexão de vigas e sistemas de massas e molas. Para resolver estas equações diferenciais podem-se utilizar diversos métodos numéricos.

Existem vários métodos numéricos para a resolução de equações diferenciais ordinárias. Os mais utilizados convertem a equação diferencial numa equação diferença [9].

A escolha dos métodos numéricos a implementar na resolução das equações diferenciais que descrevem os dois processos em estudo, baseou-se no facto deste simulador ser utilizado como uma ferramenta de uso académico. Assim, foram implementados três métodos: o mais simples (Euler), o mais utilizado (Runge-Kutta 4ªordem) e um de passo adaptativo (Runge-Kutta Felhberg).

Os métodos de Euler e Runge-Kutta 4ªordem são de passo único. Estes métodos são utilizados para resolver equações de primeira ordem. O método Runge-Kutta Felhberg é de passo variável.

Todos estes métodos são explícitos, isto é, o valor a calcular vem escrito de uma forma explícita e em função do valor do estado anterior *y(n)*.

Para além destes métodos, existem outros igualmente conhecidos, como Adams-Multon, Euler modificado (2ª ordem) e Preditores-Correctores.

2.4.1. Euler

Este método foi proposto por Euler, considerado um dos matemáticos mais notáveis do século XVIII, em 1768. O método de Euler é um processo de resolução de equações diferenciais com condições iniciais de primeira ordem. Este método consiste na utilização dos primeiros dois termos da expansão em serie de Taylor de y_{n+1}. A equação (6) é relativa a este método é a seguinte:

$$y_{n+1} = y_n + h.f(y_n) \qquad (6)$$

A explicação da utilização desta equação no cálculo de uma aproximação à função $y(x)$ é que o estado seguinte y_{n+1} vai ser igual ao estado anterior y_n, somado com o resultante do valor da função para o ponto n multiplicado por h. O valor de h é o

espaçamento constante entre os pontos do intervalo, sendo um valor bastante reduzido, de modo a que a função cresça devagar. A Figura 11 mostra a representação gráfica do funcionamento do método de Euler.

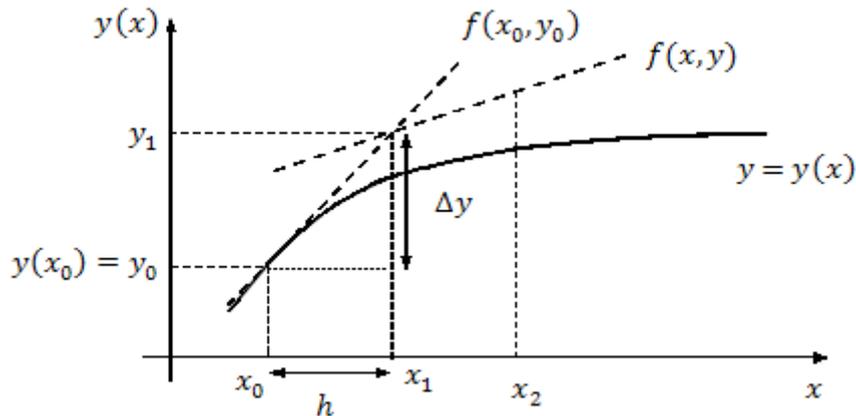



Figura 11 - Representação gráfica do método de Euler [9]

De uma forma geral, pode-se dizer que este método consiste em traçar rectas tangentes aos pontos pretendidos, que são determinados de acordo com os valores escolhidos pelo utilizador.

O método de Euler é o mais básico dos que são utilizados, uma vez que o seu funcionamento resume-se basicamente ao uso do estado anterior para o estado seguinte somado com uma variável que é determinada pelo tempo (variável independente).

O termo truncado da serie de Taylor define o erro de truncatura cometido com a aproximação pela equação (6) e pode ser definido pela seguinte equação (7).

$$E_T = \frac{1}{2} h^2 y''(\varepsilon_i) \qquad \text{com } \varepsilon_i \in [x_n, x_{n+1}] \tag{7}$$

Quanto menor for o erro de tuncatura, E_T, melhor será a precisão da aproximação calculada, y_{n+1}. A convergência do Metodo de Euler pode ser melhorada, através da diminuição do espaçamento entre os pontos. Se o espaçamento for reduzido para metade, o erro da aproximação também o é.

2.4.2. Runge-Kutta

Este método foi desenvolvido por dois matemáticos alemães, C.Runge e M.W.Kutta, por volta de 1900, sendo criado de modo a resolver equações diferenciais eficazmente, e ainda é o equivalente á aproximação da solução exacta por correspondência dos primeiros *n* (*n* representa a ordem do método) termos das séries de Taylor expandidas.

Neste trabalho são utilizados dois métodos: Runge-Kutta de 4ªordem (RK4) e Runge-Kutta Fehlberg (RK45). O método de Runge-Kutta Fehlberg utiliza a quarta e quinta ordens. Para além de diferirem na ordem dos seus termos, estes métodos tem outra diferença bastante importante, o primeiro é de passo único, ou seja, não vai variar o passo, enquanto que o segundo é de passo variável, ou seja, este método tem a capacidade de variar o passo conforme a evolução do processo. Entende-se como passo, o espaçamento entre os pontos do intervalo.

2.4.2.1. Runge-Kutta 4ª ordem

Dos métodos de Runge-Kutta, o de quarta ordem é o mais utilizado. O método de Runge-Kutta de quarta ordem (RK4) inclui mais pontos no intervalo de maneira a ser mais preciso. Isto é, a estimativa à função *y(x)* é baseada em vários pontos intermédios. Os coeficientes 1,2,2,1 definem o peso para os parâmetros k_1, k_2, k_3 *e* k_4, respectivamente. A determinação dos vários parâmetros é realizada com o auxílio da expansão de Taylor. Resumidamente a equação é descrita na equação (8).

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \tag{8}$$

Os parâmetros *k* são calculados a partir das seguintes equações:

$$k_1 = hf(x_n, y_n) \tag{9}$$

$$k_2 = hf\left(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}k_1\right)$$

$$k_3 = hf\left(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}k_2\right)$$

$$k_4 = hf(x_n + h, y_n + k_3)$$

Os novos valores de k são calculados tendo em conta o valor do k anterior, excepto no caso do primeiro, onde apenas se substitui os valores de x e y, de modo a determinar o valor da função nesse ponto e multiplica-se por h, equivalente ao segundo termo da fórmula do método de Euler, equação (6) .

Comparado com o método de Euler, consegue-se atingir uma precisão melhor nos resultados finais. No entanto exige mais cálculos.

O valor de h é o espaçamento entre os valores do tempo, este valor vai ser relativamente reduzido, de modo a que a evolução do processo ser mais realista. Este valor de h define o passo deste método, e uma vez que não vai variar, é deste modo considerado um método de passo fixo.

A partir do cálculo destes parâmetros, e da substituição na equação geral da RK4, pode-se verificar a evolução de um determinado processo.

Este método faz uma média dura entre os valores dos pontos intermédios (k_n), de modo a ter uma evolução mais precisa. Estes valores de k_n representam o número de passos intermédios que há entre cada passo.

O erro neste método não é considerado, uma vez que é um processo muito complicado, fica apenas como referencia que tem erro local de $O(h^5)$, e erro global de $O(h^4)$.

2.4.2.2. Runge-Kutta Fehlberg

Entre os métodos de passo variável, o método de RK45 é o mais confiável. Este método utiliza a ideia geral do RK4, acima descrita, e calcula duas estimativas: $(\hat{y}_{n+1})$ de 4ª ordem e (y_{n+1}) de 5ª ordem, ambas utilizando os mesmo 6 k´s para os cálculos:

$$k_1 = h.f(x_n, y_n) \tag{10}$$

$$k_2 = h.f\left(x_n + \frac{h}{4}, y_n + \frac{k_1}{4}\right)$$

$$k_3 = h.f\left(x_n + \frac{3h}{8}, y_n + \frac{3k_1}{32} + \frac{9k_2}{32}\right)$$

$$k_4 = h.f\left(x_n + \frac{12h}{13}, y_n + \frac{1932k_1}{2197} - \frac{7200k_2}{2197} + \frac{7296k_3}{2197}\right)$$

$$k_5 = h.f\left(x_n + h, y_n + \frac{439k_1}{216} - 8k_2 + \frac{3680k_3}{513} - \frac{845k_4}{4104}\right)$$

$$k_6 = h.f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n - \frac{8k_1}{27} + 2k_2 - \frac{3544k_3}{2565} + \frac{1859k_4}{4104} - \frac{11k_5}{40}\right)$$

Este método pode ser expandido para variações de passo, através do cálculo do erro E, equação (13).

Para uma aproximação á solução utiliza-se o método de Runge-Kutta de quarta ordem, a equação é a seguinte:

$$\hat{y}_{n+1} = y_n + \left(\frac{25k_1}{216} + \frac{1408k_3}{2565} + \frac{2197k_4}{4104} - \frac{k_5}{5}\right), \text{ com erro global de } O(h^4) \quad (11)$$

Para obter uma melhor resposta utiliza-se o método de Runge-Kutta de quinta ordem:

$$y_{n+1} = y_n + \left(\frac{16k_1}{135} + \frac{6656k_3}{12825} + \frac{28561k_4}{56430} - \frac{9k_5}{50} + \frac{2k_6}{55}\right), \text{ com erro global de } O(h^5) \quad (12)$$

Este método pode ser expandido para variações de passo, através do cálculo do erro E, equação (13).

O cálculo do erro é determinado através da equação (13), onde o erro é igual á diferença entre a quinta ordem (y_{n+1}) e a quarta ($\hat{y}_{n+1}$).

$$E = |y_{n+1} - \hat{y}_{n+1}| \quad (13)$$

Resolvendo a equação (13) obtemos a equação (14).

$$E \doteq \frac{k_1}{360} - \frac{128k_3}{4275} - \frac{2197k_4}{75240} + \frac{k_5}{50} + \frac{2k_6}{55} \quad (14)$$

Como este método é de passo variável, o valor de *h* pode variar em cada etapa, de modo a obter uma melhor aproximação. Para ocorrer esta variação temos um valor de tolerância (valor muito próximo de zero), para fazer a comparação do erro, *E*, obtido. Se o erro for maior que o valor da tolerância o *h* vai ser dividido por 2, caso contrario será multiplicado por 2, se for igual, o *h* mantém-se.

Este método tem 6 passos intermédios, ou seja, é mais preciso que o RK4. O erro local é de $O(h^6)$.

2.5.Ferramenta utilizada

A ferramenta utilizada neste projecto foi o LabVIEW.

A sigla LabVIEW vem de Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench. Pertencente à National Instruments, o LabVIEW é uma linguagem de programação gráfica baseada em fluxo de dados, é ideal para programação paralela, é das melhores ferramentas de software para tecnologia Multicore, sendo que combina o desempenho multicore para plataformas de hardware com tempo real.

O LabVIEW é uma linguagem gráfica e intuitiva. Para resolver os mais diversos problemas utilizam-se diagramas de blocos. Com processadores multicore podem-se executar tarefas em paralelo, reduzindo bastante ao tempo dispendido nas operações.

Cada trabalho desenvolvido em LabVIEW é designado por VI (Virtual Instrument) e contém um diagrama de blocos (block diagram) e um painel frontal (front panel) como se pode ver na Figura 12. No diagrama de blocos encontra-se a programação do VI, enquanto que no painel frontal se encontra o interface.

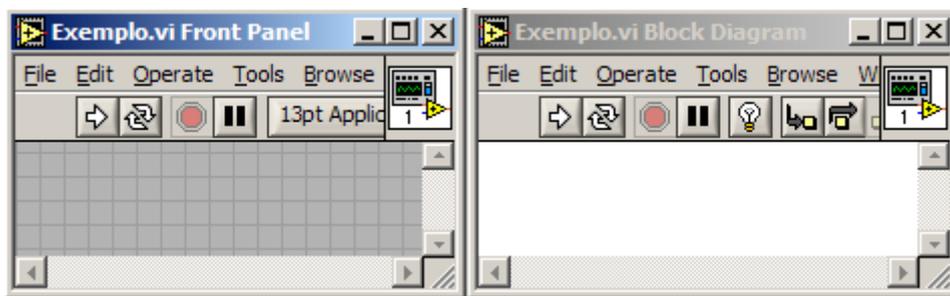



Figura 12 – Exemplo de um VI

Através destes VI´s pode se ter programas dentro de programas, ou seja, dentro de um VI pode ter-se um sub-VI ou vários.

3. Trabalho Desenvolvido

Com o simulador desenvolvido é possível testar dois processos muito comuns na indústria, controlo de nível e de temperatura em reservatório com diferentes algoritmos de controlo. O utilizador pode seleccionar o método numérico a testar entre três

disponíveis. O sistema funciona em malha aberta ou malha fechada. O utilizador pode alterar os parâmetros do modelo e do controlo.

A evolução destes processos e dos seus diversos modos de funcionamento pode ser visualizada graficamente no simulador.

O simulador funciona local e remotamente, tendo sido criada uma página Web através do LabVIEW para esta última funcionalidade.

3.1.Modelização do processo

O modelo matemático de um sistema dinâmico é definido como um conjunto de equações que representam a dinâmica do sistema. A modelização destes sistemas através destas leis conduz-nos sempre a equações diferencias, que traduzem o comportamento do sistema ao longo do tempo.

Com a modelização vai-se obter a resposta, ou evolução, de um determinado sistema através da relação das variáveis desse processo.

Na modelização deste processo existem dois modelos essenciais a ter conta, o modelo do nível no reservatório e o modelo da temperatura.

3.1.1-Modelização do nível do reservatório

A modelização do nível do reservatório baseia-se no princípio da conservação da massa: a quantidade água que sai do reservatório é igual á que entra, menos a quantidade acumulada no interior do reservatório.

Na Figura 13 está exemplificado o sistema de controlo de nível no reservatório, em que *Fe* é o fluxo de entrada, *Fs* representa o fluxo de saída, *h* representa a altura do líquido dentro do reservatório e *A* representa a área.

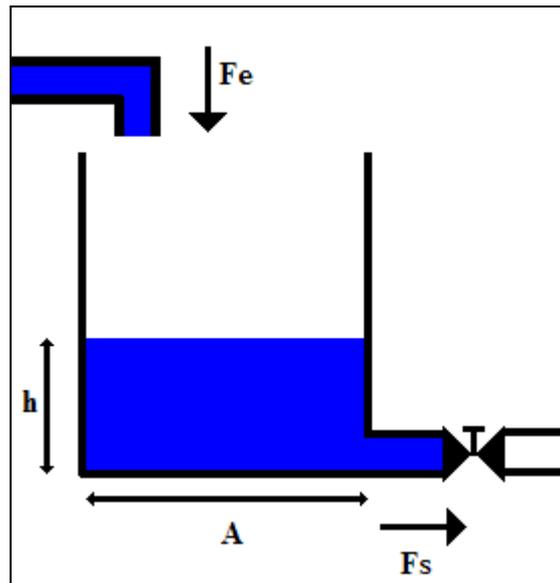



Figura 13 – Exemplo de controlo de nível no reservatório

De modo a ter a equação que determina o controlo do nível no reservatório, foi feito o desenvolvimento da lei da conservação da massa, como se pode ver na equação (15).

$$Quantidade\ de\ Liquido\ acumulado = Quantidade\ de\ Liquido\ que\ entra - Quantidade\ de\ Liquido\ que\ sai \quad (15)$$

Transformando esta equação, vem:

$$A * \frac{dh(t)}{dt} = Fe - Fs \quad (16)$$

Assumindo que o caudal de saída varia linearmente com a altura de água no reservatório, vem:

$$Fs = \frac{h}{R} \quad (17)$$

Em que R é a resistência da válvula de saída. Substituindo na equação (16), vem:

$$A * \frac{dh(t)}{dt} = Fe - \frac{h}{R} \quad (18)$$

Resolvendo de modo a isolar a derivada no membro esquerdo da equação obtém-se:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{Fe}{A} - \frac{h}{A*R} \tag{19}$$

A equação (19) traduz o perfil da variação da altura de água no reservatório em função do caudal de entrada no tanque, *Fe*. O valor da área não é uma variável, uma vez que esse valor é considerado constante.

3.1.1. Modelização da temperatura no reservatório

Para modelizar a temperatura no reservatório aplica-se o princípio da conservação de energia. Na Figura 14 pode ver-se o exemplo de como é feito o aquecimento no reservatório, utilizando-se uma resistência de aquecimento.

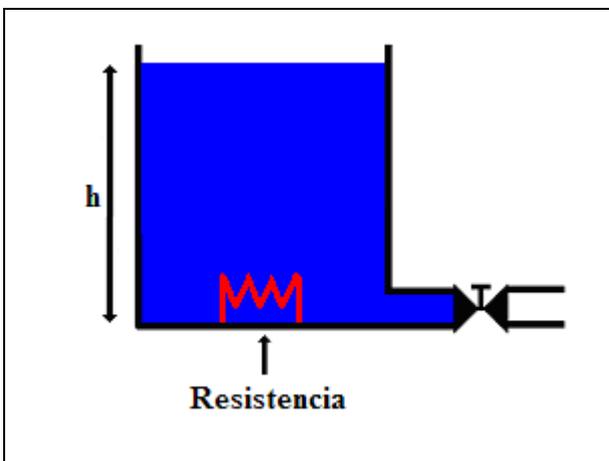



Figura 14- Exemplo de aquecimento no reservatório

De modo a ter a equação que determina o modelo da evolução da temperatura no reservatório, foi aplicada a seguinte equação de balanço energético, considerando que as perdas por evaporação são desprezáveis.

$$Energia\ acumulada\ no\ reservatorio = Potência\ de\ aquecimento\ aplicada\ no\ liquido - perdas\ de\ calor\ do\ liquido \tag{20}$$

Transformando a equação vem:

$$Ct * \frac{d\Delta\theta(t)}{dt} = qe(t) - \frac{\Delta\theta(t)}{Rt} \tag{21}$$

em que *Ct* é a capacidade térmica, $\Delta\theta$ é a variação da temperatura (diferença entre a temperatura no reservatório e a temperatura ambiente), *qe* é a potência da resistência de aquecimento e *Rt* a resistência térmica. Isolando a derivada no membro esquerdo da equação vem:

$$\frac{d\Delta\theta(t)}{dt} = \frac{qe(t)}{Ct} - \frac{\Delta\theta(t)}{Rt*Ct} \tag{22}$$

A equação (22) modeliza a variação de temperatura de água no interior do reservatório ao longo do tempo.

3.2. Simulação numérica do processo

Foram implementados de raiz os três métodos numéricos seleccionados na simulação numérica.

Em todos os métodos, o utilizador deve definir um passo de integração, sendo que no Euler e no RK4, esse passo não irá variar, enquanto que no método RK45 o passo é variável.

3.2.1. Método de Euler

Na Figura 15 pode ver-se a implementação do método de Euler, apenas com as operações aritméticas da equação do processo e com o cálculo do erro (equação (7)).

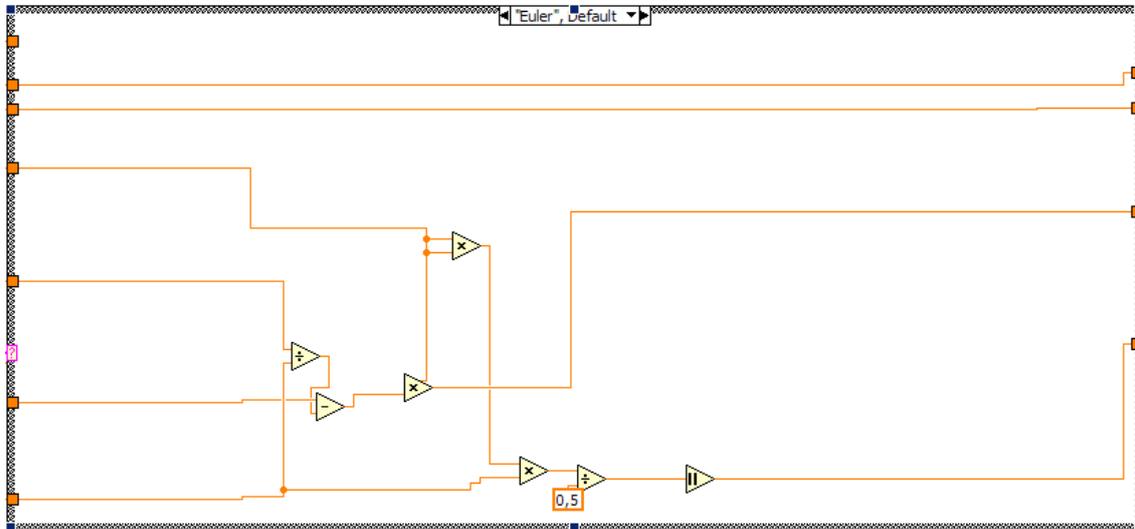



Figura 15 - Método de Euler

3.2.2. Método de Runge-Kutta de 4ª ordem

Na implementação deste método pode ver-se os cálculos dos *k´s* da equação (8)0, seguido da média pesada desses valores. O erro neste método não é considerado.

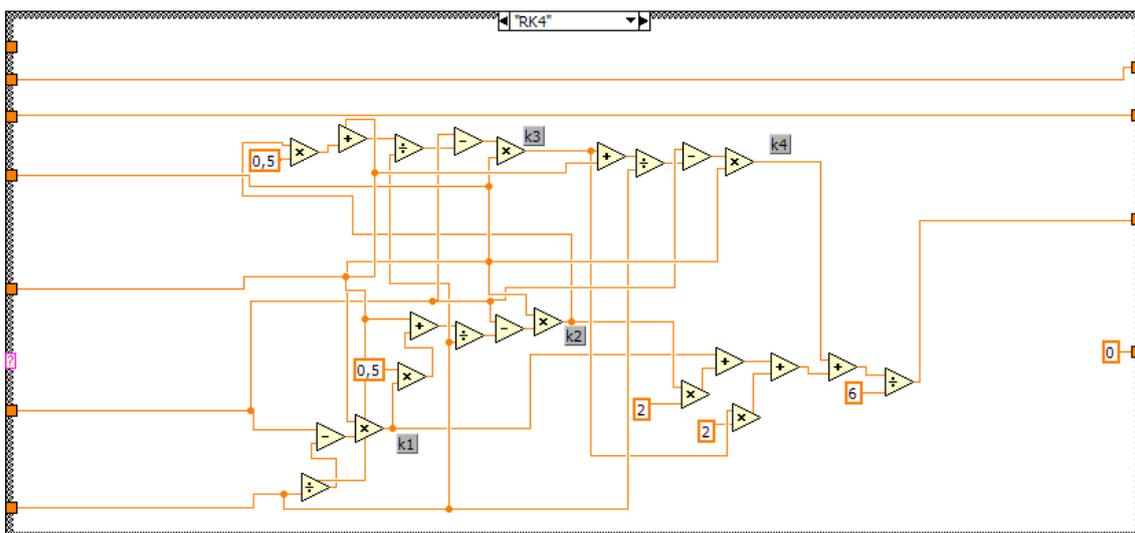



Figura 16 - Diagrama de blocos do método RK4

3.2.3-Método de Runge-Kutta Fehlberg

Como este método é de passo variável obriga a uma implementação mais complexa, como se pode ver através dos blocos de programação presentes na Figura 17. Este método também contém mais operações aritméticas uma vez que são necessários calcular mais k´s que no método anterior (equação (10)). Para além disso é também necessário calcular o erro (equação (13)).

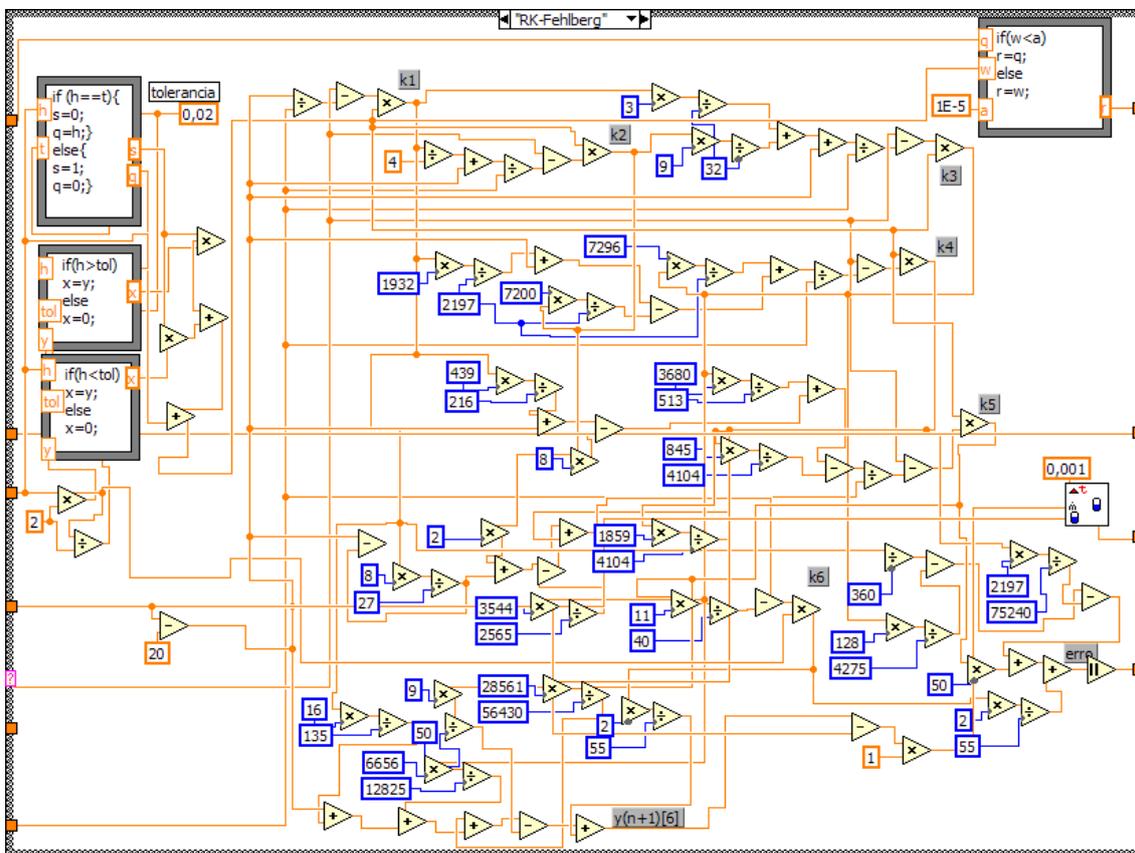



Figura 17 - Diagrama de blocos do método RK45

3.3. Interface em malha aberta

No interface em malha aberta estão disponíveis os sistemas de controlo de nível e de temperatura.

No controlo de nível o sistema varia conforme o fluxo de entrada e a resistência da válvula. Como este exemplo é em malha aberta assumiu-se que as válvulas de entrada e saída vão estar sempre abertas.

No sistema de temperatura, quando o programa é accionado, o tanque enche automaticamente até ao nível máximo e só depois a resistência liga no valor de potência definido pelo utilizador.

3.3.1. Controlo de nível no reservatório

A Figura 18 apresenta o processo de controlo do nível de água no reservatório em malha aberta representado num diagrama de blocos. Em malha aberta o sistema não faz a comparação do valor real com o valor desejado, não existe realimentação.

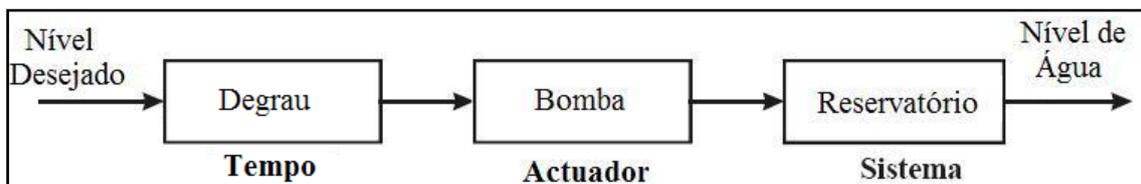



Figura 18 – Controlo de nível em malha aberta

Para se fazer o controlo em malha aberta do nível no reservatório aplica-se um determinado valor de fluxo de entrada, o que faz com que o actuador seja activado e o sistema inicie o ciclo de funcionamento, ou seja, o reservatório vai encher.

3.3.1.1. Painel do controlo de nível em malha aberta

Neste painel podem ver-se as variáveis deste processo, assim como o método seleccionado, o erro, o tempo de simulação, o gráfico do fluxo (entrada-valores positivos e saída-valores negativos) e o gráfico da altura do nível do tanque.

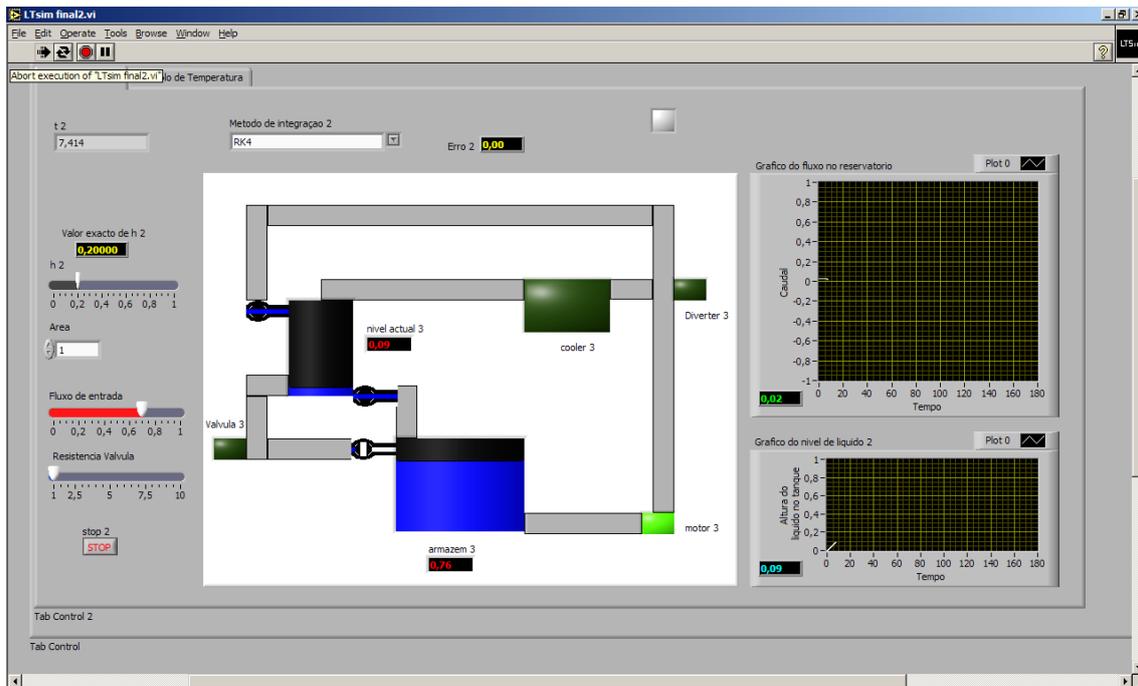



Figura 19 - Painel do controlo de nível em malha aberta

3.3.2. Controlo de temperatura no reservatório

De modo a controlar a temperatura no interior do reservatório faz-se sensivelmente o mesmo que se utilizou para controlar o nível, ou seja, o utilizador introduz o valor da potência da resistência de aquecimento e o sistema inicia o ciclo de funcionamento, aquecendo a água no reservatório. Na Figura 20 encontra-se o diagrama de blocos desse processo.

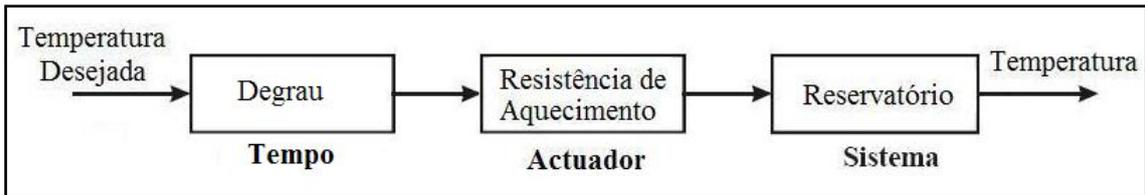



Figura 20 – Controlo da temperatura em malha aberta

Para realizar este controlo optou-se por considerar que o reservatório terá de se encontrar cheio, uma vez que é uma das especificações do manual do kit experimental que se pretende replicar em ambiente virtual. Logo que o reservatório se encontre cheio, o actuador (resistência de aquecimento) liga aumentando a temperatura no reservatório.

3.3.2.1. Painel do controlo da temperatura em malha aberta

Neste painel encontram-se as variáveis de entrada do processo, assim como as variáveis de saída: o tempo de simulação, o erro, o método de integração, gráficos da temperatura, do caudal de entrada, e da altura de líquido no reservatório.

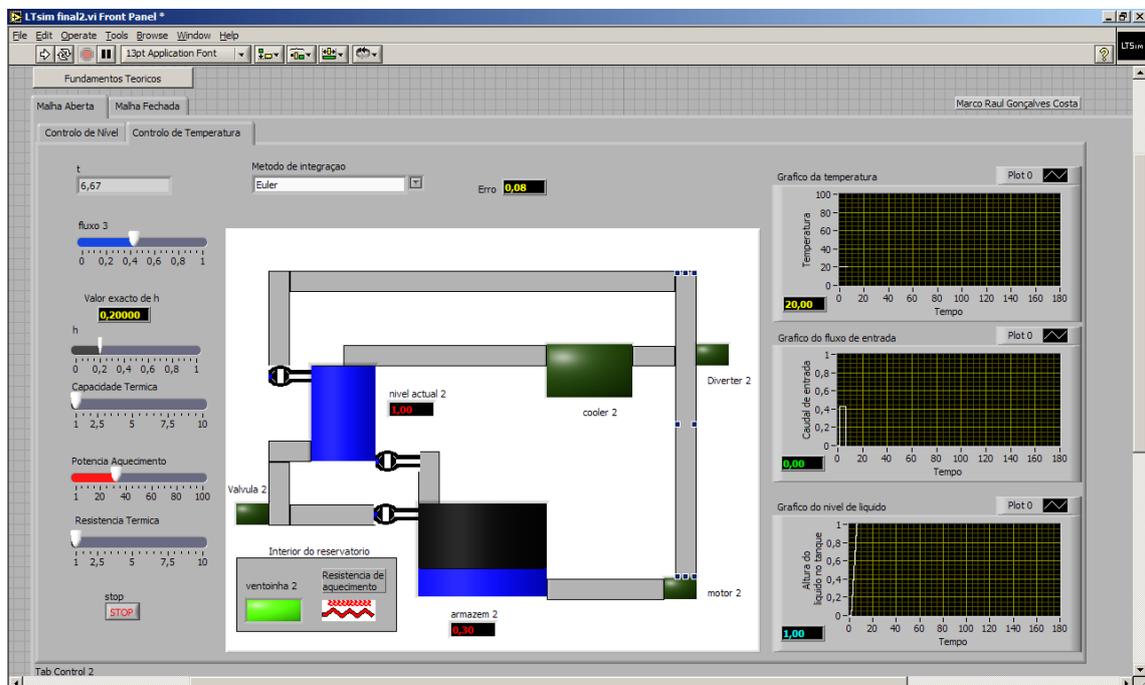



Figura 21 - Painel do controlo de temperatura em malha aberta

3.4. Interface em malha fechada

De modo a controlar o nível no reservatório em malha fechada, vai-se aplicar realimentação ao processo, com a finalidade de comparar o valor real do nível de água no reservatório com o desejado, e diminuir eventuais desvios. Essa realimentação vai ser feita com um sensor de nível, que vai informar qual o nível no reservatório.

A Figura 22 apresenta o diagrama de blocos deste processo. O controlador calcula o erro, e aplicando a lei de controlo seleccionada, regula o processo de modo a atingir o objectivo.

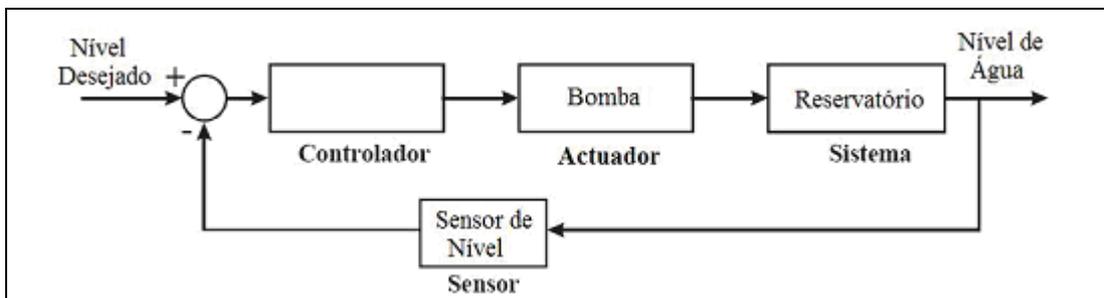



Figura 22 – Controlo de nível em malha fechada

3.4.1. Painel de controlo de nível em malha fechada

Na Figura 23 pode ver-se o painel de controlo de nível em malha fechada.

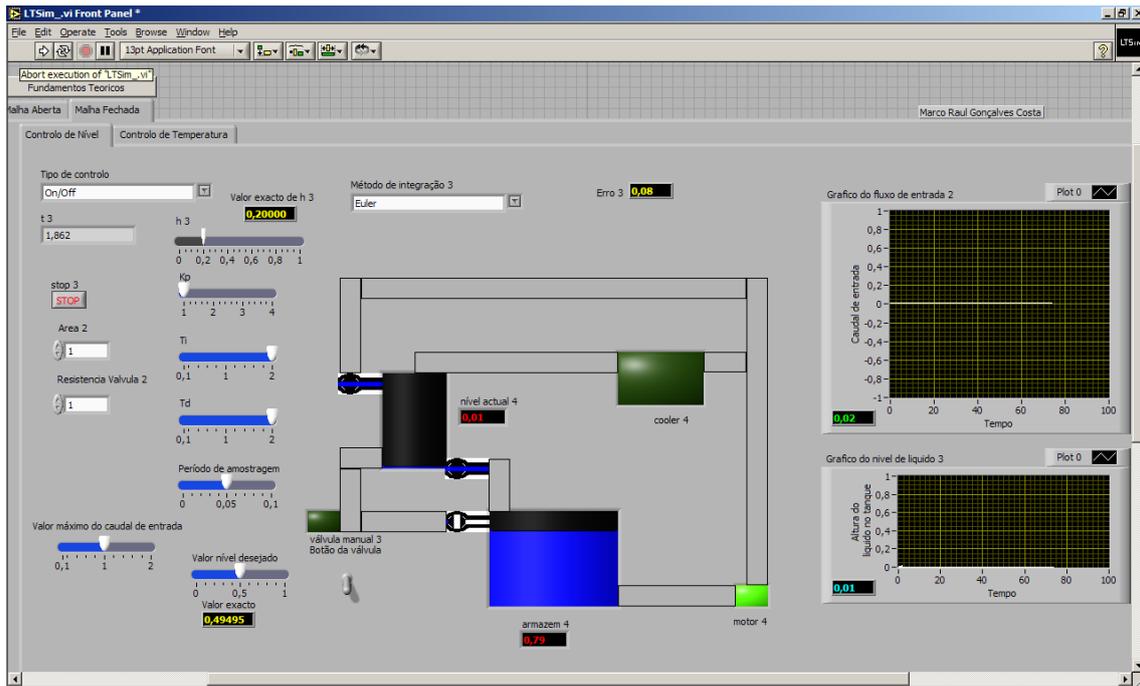



Figura 23 – Painel de controlo de nível em malha fechada

Para fazer o controlo em malha fechada da temperatura utiliza-se sensivelmente o mesmo modelo que se utilizou para fazer o controlo de nível, como se pode ver na Figura 24, fazendo os respectivos ajustes.

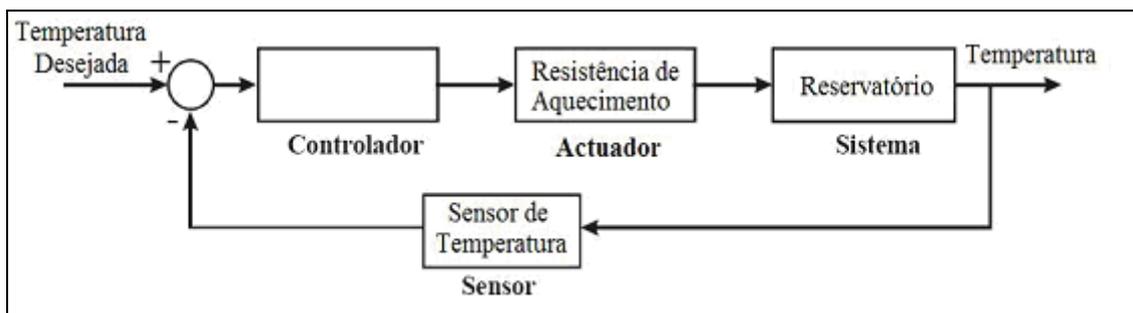



Figura 24 – Controlo da temperatura em malha fechada

Para realizar este controlo, o tanque terá de se encontrar cheio, antes de efectuar aquecimento. De modo a calcular o valor desejado de temperatura do líquido no reservatório o processo é realimentado com o sensor de temperatura, de modo a que esse valor seja atingido.

3.4.2. Painel de controlo da temperatura em malha fechada

O painel criado para controlo da temperatura em malha fechada está presente na Figura 25.

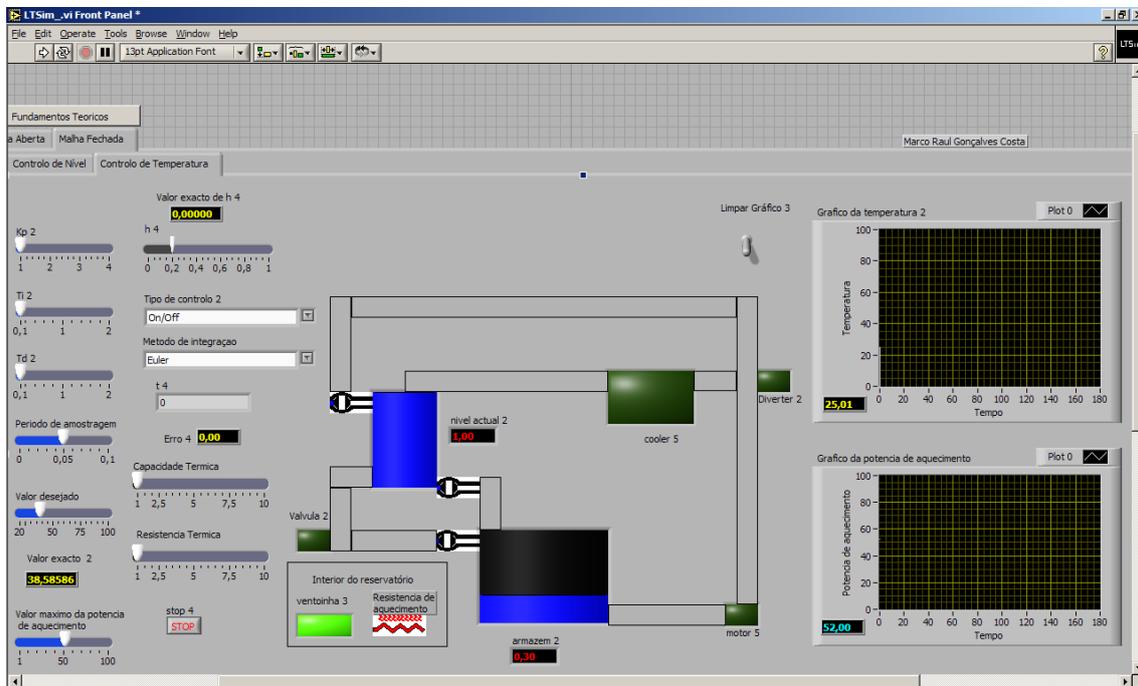



Figura 25 – Painel de controlo da temperatura em malha fechada

No controlo de temperatura em malha fechada o processo não é realizado como em malha aberta, isto é, em malha aberta o tanque ia encher, enquanto que neste o tanque encontra-se sempre cheio.

3.5. Algoritmos

Os algoritmos utilizados são os referidos anteriormente, ou seja, o On/Off, que é bastante simples, e o PID, este mais complexo.

3.5.1. On/Off

Na Figura 26 pode-se ver a implementação do algoritmo On/Off presente no simulador.

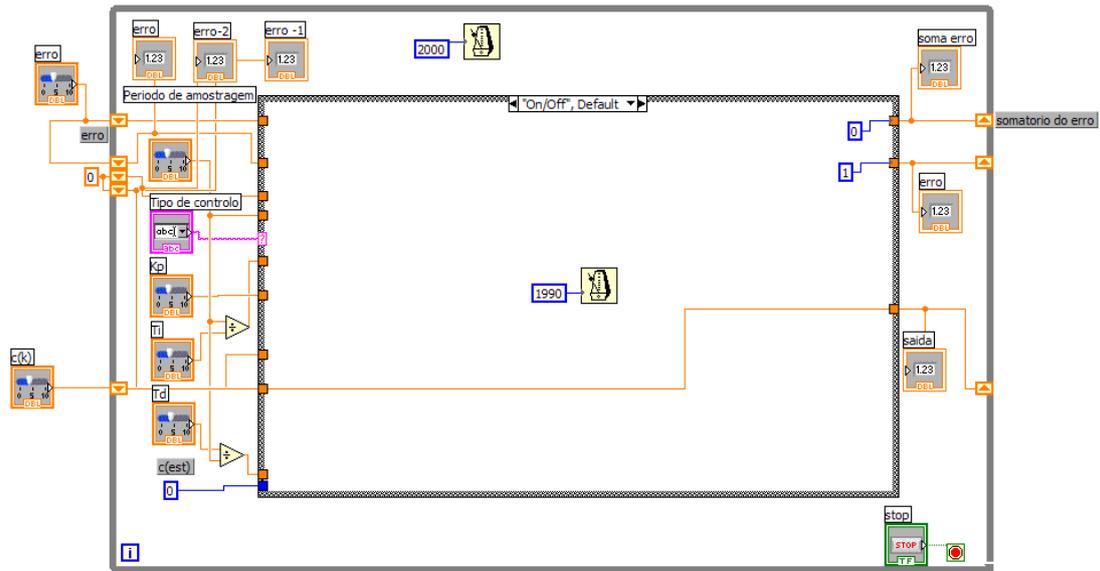



Figura 26 – Implementação do algoritmo On/Off

3.5.2. PID

Para o algoritmo PID há dois casos: o PID de velocidade (Figura 27) e de posição (Figura 28).

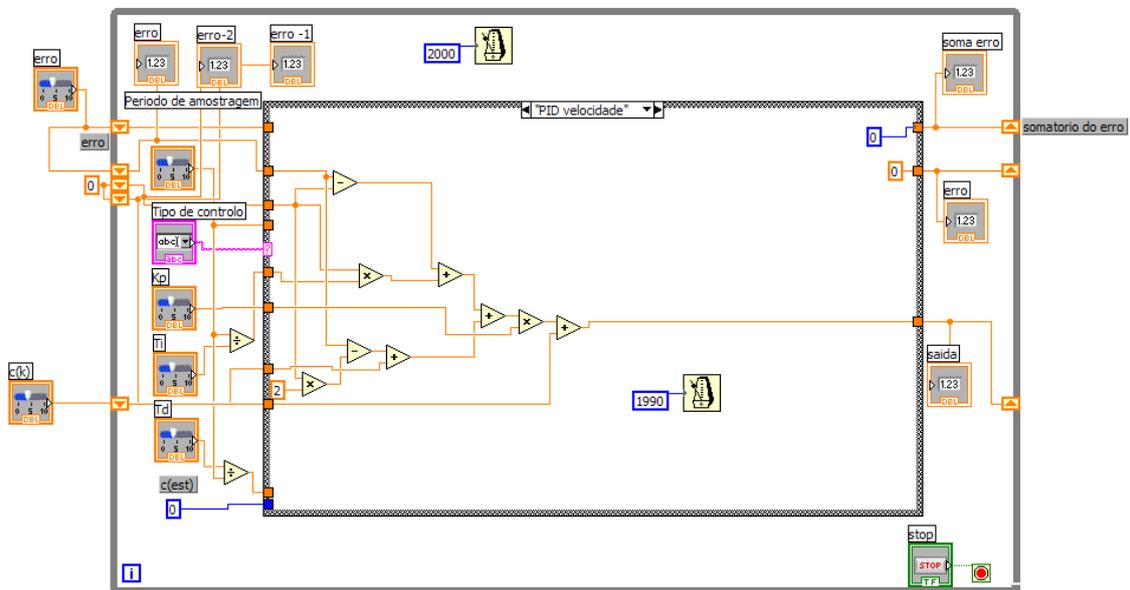



Figura 27 – PID de velocidade

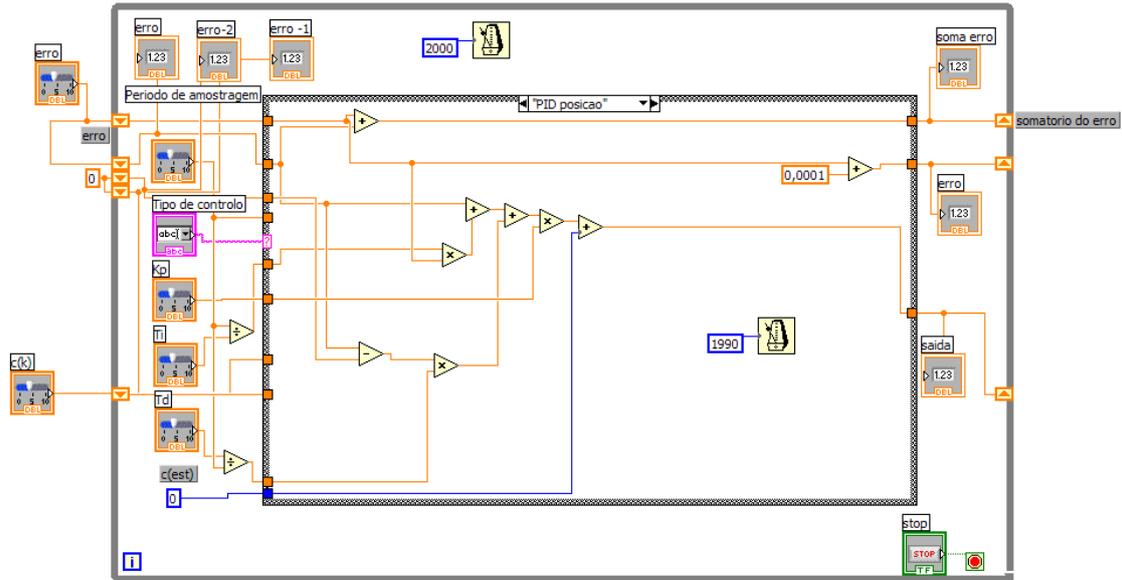



Figura 28 – PID de posição

3.6.Interface do simulador

Como se pode constatar na Figura 29 estão disponíveis as opções do simulador, malha aberta e malha fechada, botão de suporte teórico e variáveis para cada processo.

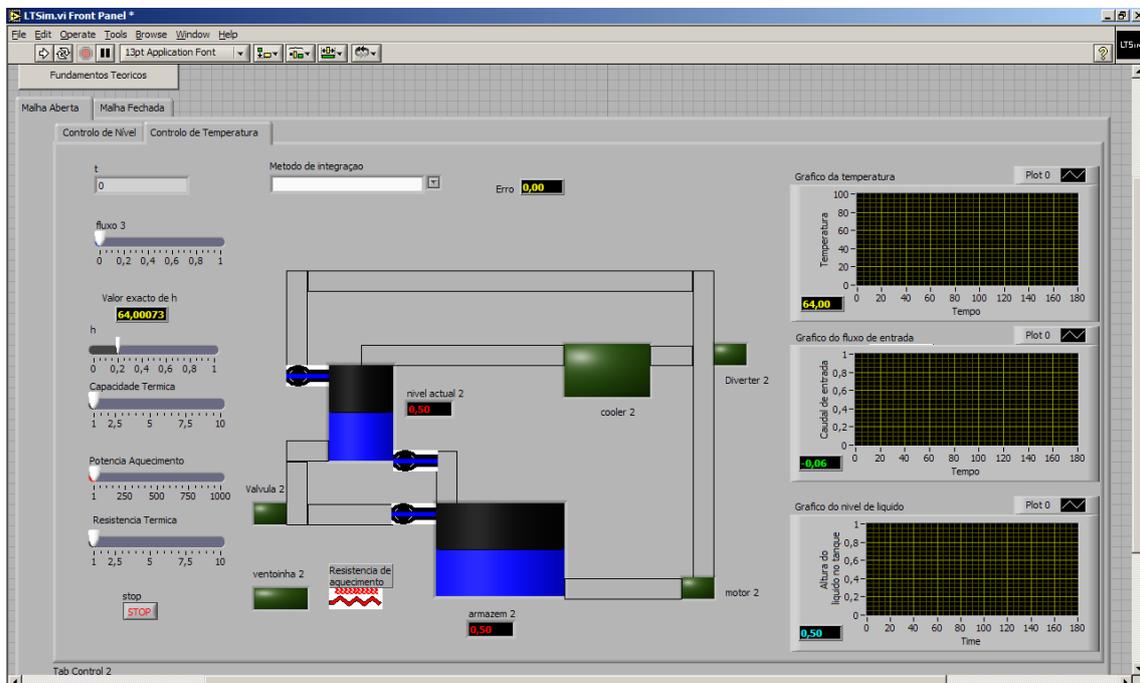



Figura 29 – Interface do simulador

3.7. Fundamentos Teóricos

No caso do utilizador ter dúvidas sobre algum componente do simulador, foi criado um botão de acesso ao suporte teórico (FTeor.vi), que permite a consulta de uma breve explicação sobre os aspectos mais importantes deste simulador (Figura 30, Figura 31 e Figura 32).

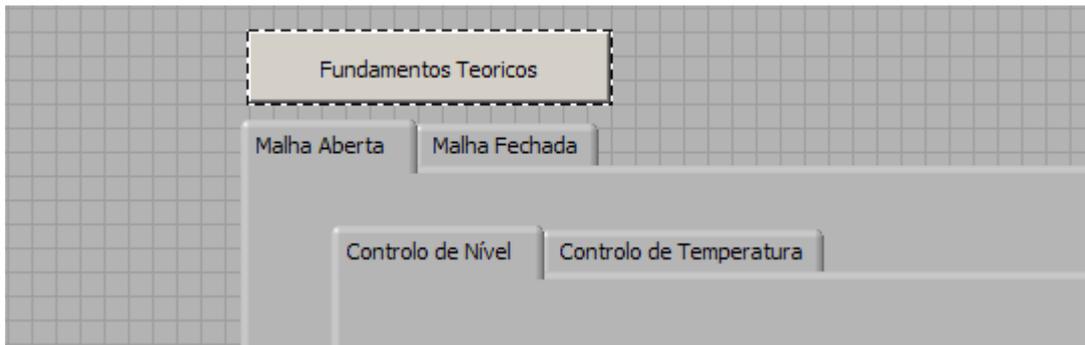



Figura 30 – Botão dos fundamentos teóricos no painel principal

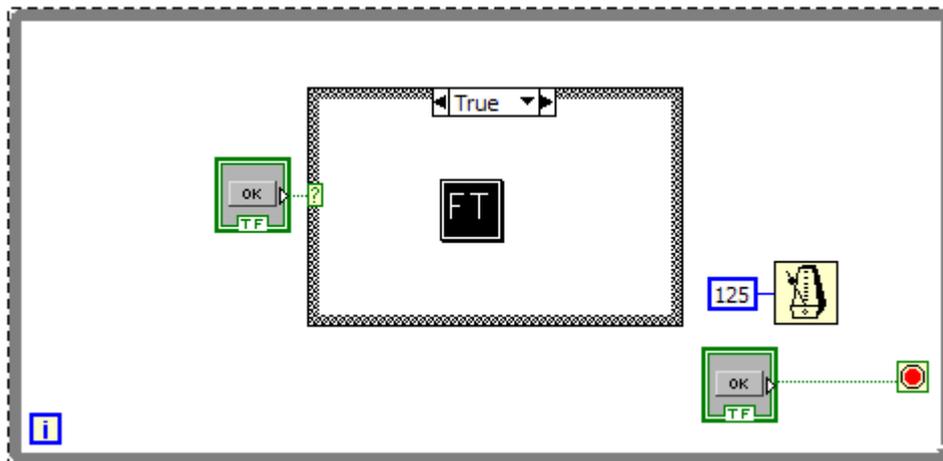



Figura 31 – Implementação da VI dos fundamentos teóricos

Este ciclo funciona quando o botão Fundamentos teóricos for premido, e vai estar visível até quando o utilizador desejar, uma vez que para o parar basta carregar no botão OK.

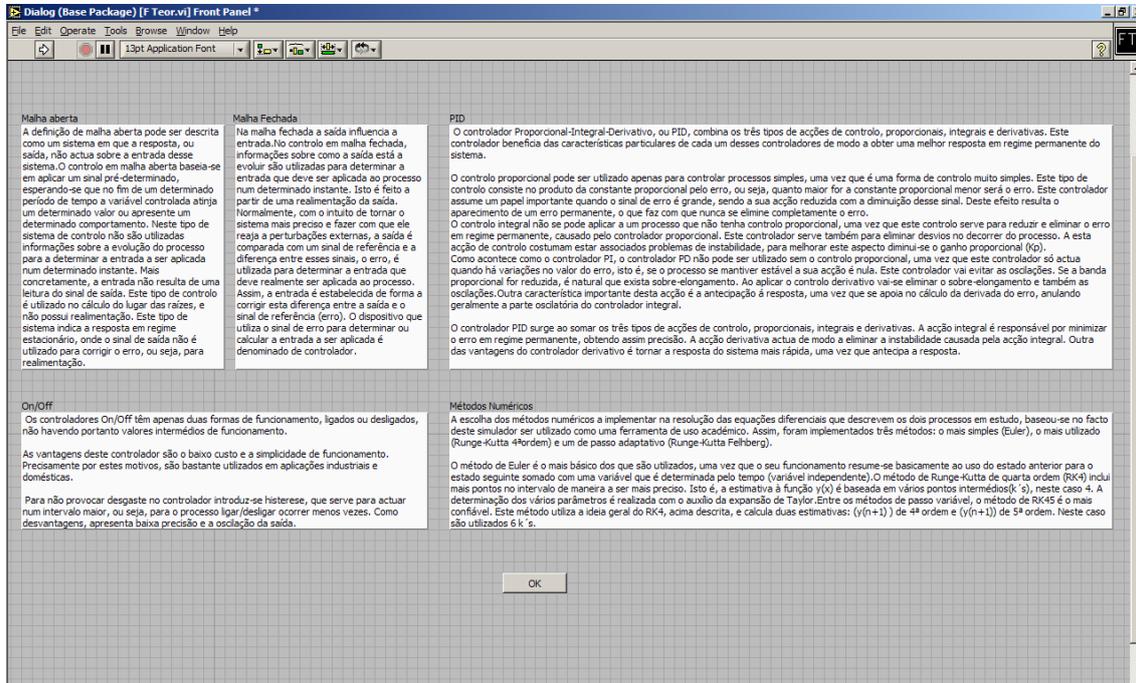



Figura 32 – Conteúdo da VI dos fundamentos teóricos

Nesta VI tem-se disponíveis definições dos conceitos mais importantes, malha aberta, malha fechada, algoritmo PID, algoritmo On/Off e métodos numéricos.

3.8 - Página Web

De modo a se poder aceder a este simulador de uma forma remota foi criada esta pagina Web. Isto é possível através da ferramenta Web publishing tool que o LabView nos oferece.

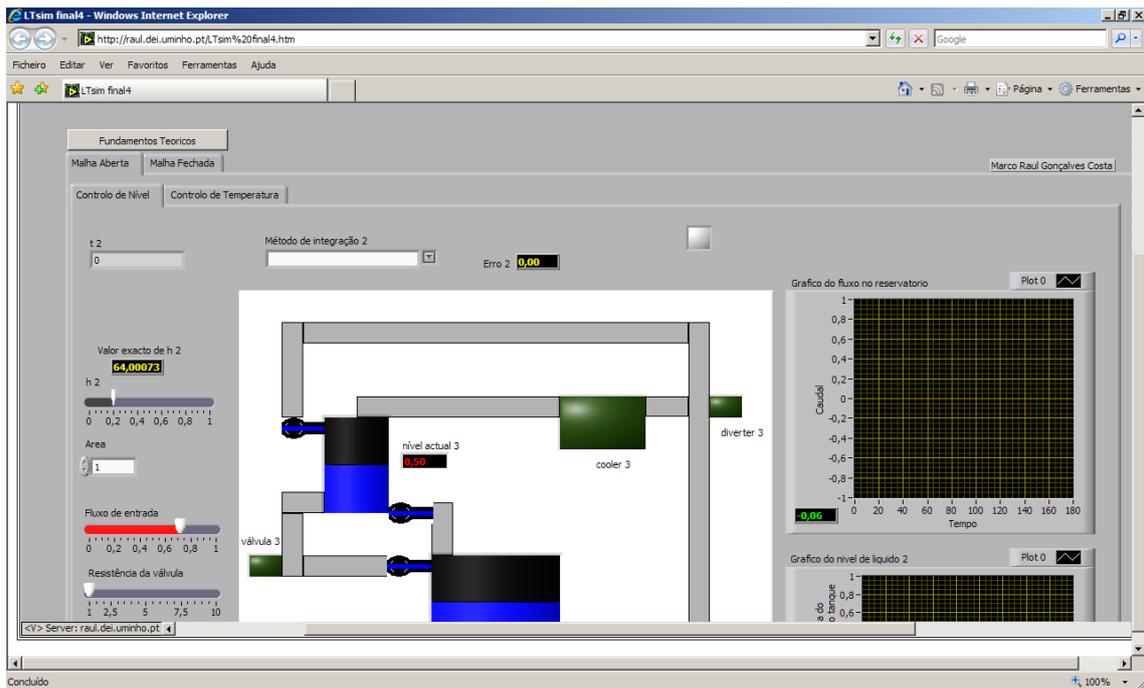



Figura 33 – Página Web do simulador

Esta página pode ser visualizada no seguinte endereço:

http://raul.dei.uminho.pt/LTsim%20final4.htm

4. Resultados

De modo a se poder ter uma melhor percepção da utilização dos diferentes métodos numéricos e algoritmos de controlo, estão de seguida esses resultados, em malha aberta estão as respostas para a comparação dos métodos numéricos e para os algoritmos de controlo encontram-se esses resultados em malha fechada.

4.1. Malha aberta

De modo a ver graficamente os resultados para as diferentes opções escolhidas no simulador, ficam aqui registados exemplos do funcionamento para diversos valores de variáveis e modos de funcionamento.

Para o controlo de temperatura em malha aberta, para um *h* de 0,2 com o método de Euler, com um fluxo de 0,5, a resistência térmica e a capacidade térmica no mínimo (1) e potência de aquecimento igual a 20 tem-se a seguinte resposta do sistema para o método de Euler (Figura 34).

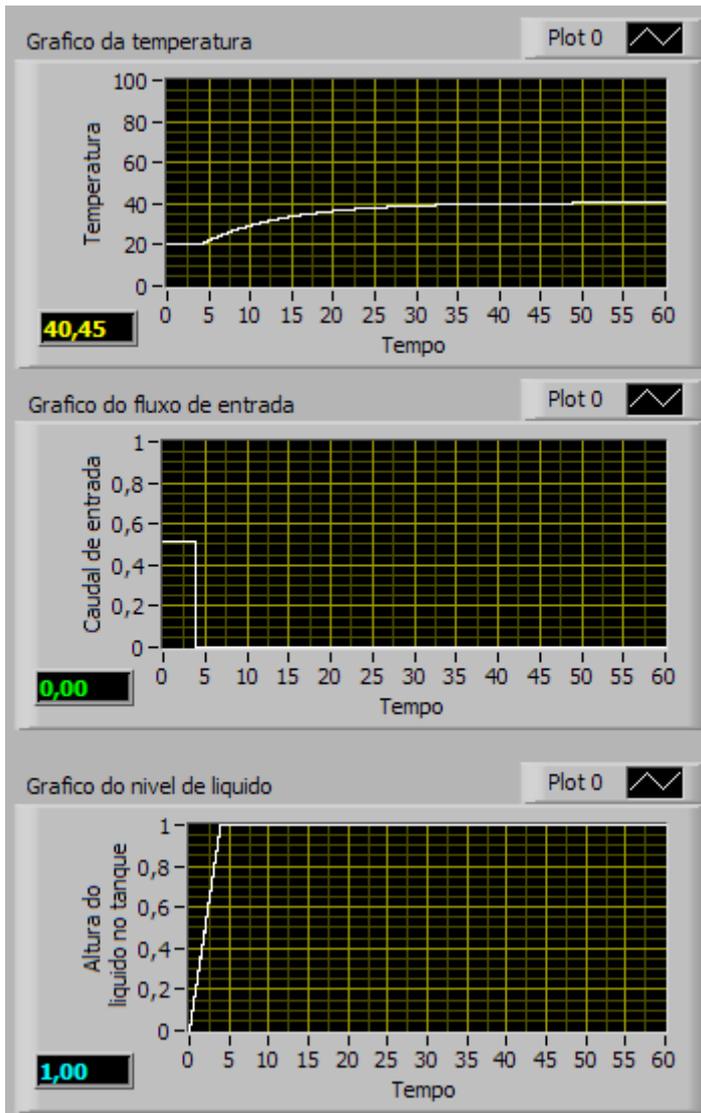



Figura 34 – Resposta do sistema de controlo de temperatura em malha aberta (Euler)

Como se pode visualizar graficamente o tanque demora menos de 5 unidades de tempo a encher, a válvula de entrada está aberta durante esse tempo e depois é fechada, a válvula de saída está sempre fechada. A partir daí a resistência de aquecimento é activada e começa a aquecer a água. O erro calculado neste método é de 0,08.

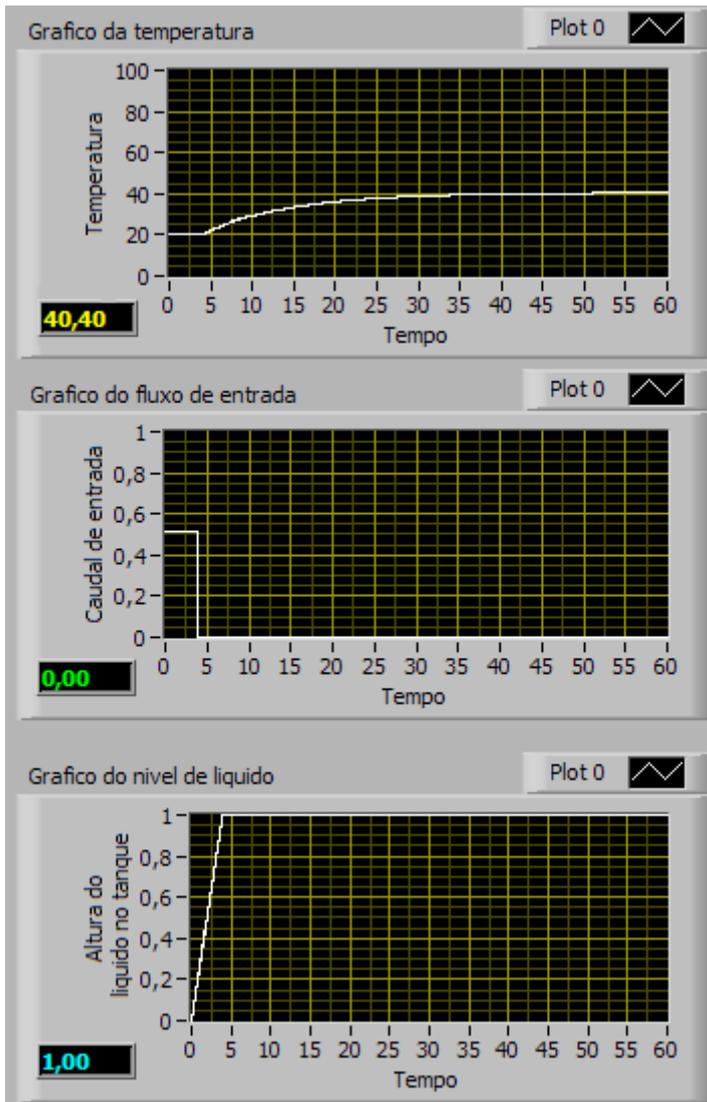



Figura 35 - Resposta do sistema de controlo de temperatura em malha aberta (RK4)

Este método (RK4) segue o mesmo raciocínio do anterior, o tempo de enchimento do reservatório é igual ao anterior, uma vez que o método só actua na parte de aquecimento.

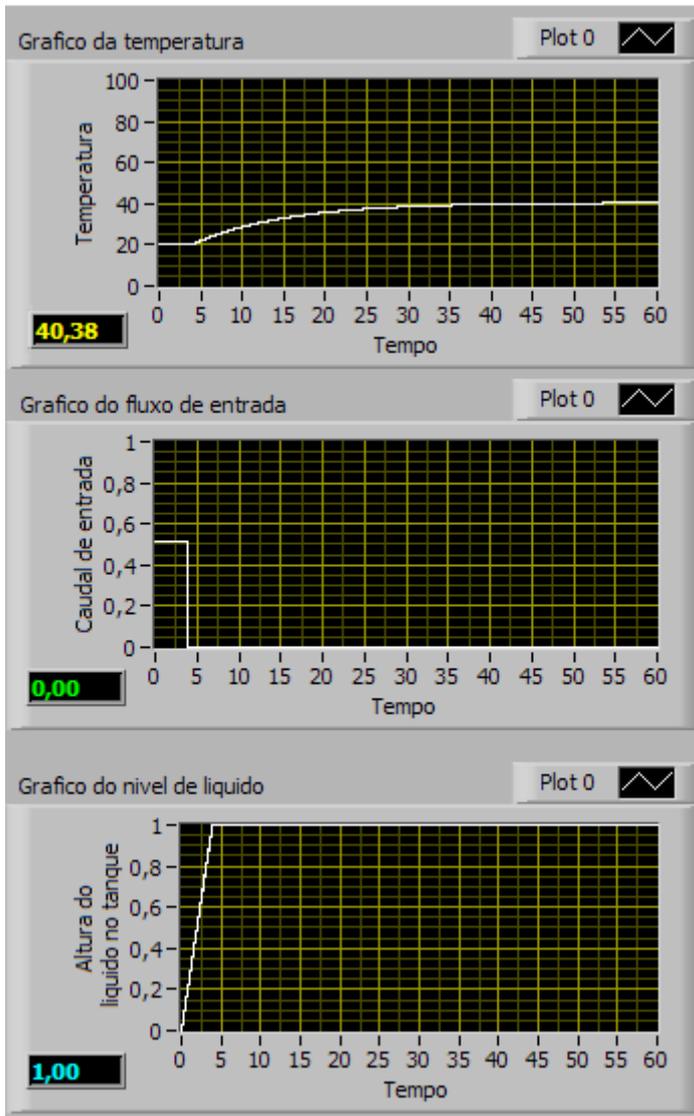



Figura 36 - Resposta do sistema de controlo de temperatura em malha aberta (RK45)

O erro neste método inicialmente é máximo e com a evolução do processo vai tornar-se zero.

4.2. Malha Fechada

Para testar em malha fechada o controlo de temperatura utilizou-se um passo de integração de 0,2, Kp de 1,Td e Ti de 0,1. O período de amostragem utilizado foi 0,05, o nível desejado escolhido foi de aproximadamente 53 graus e o valor máximo da potência de aquecimento 50. O método escolhido foi Euler.

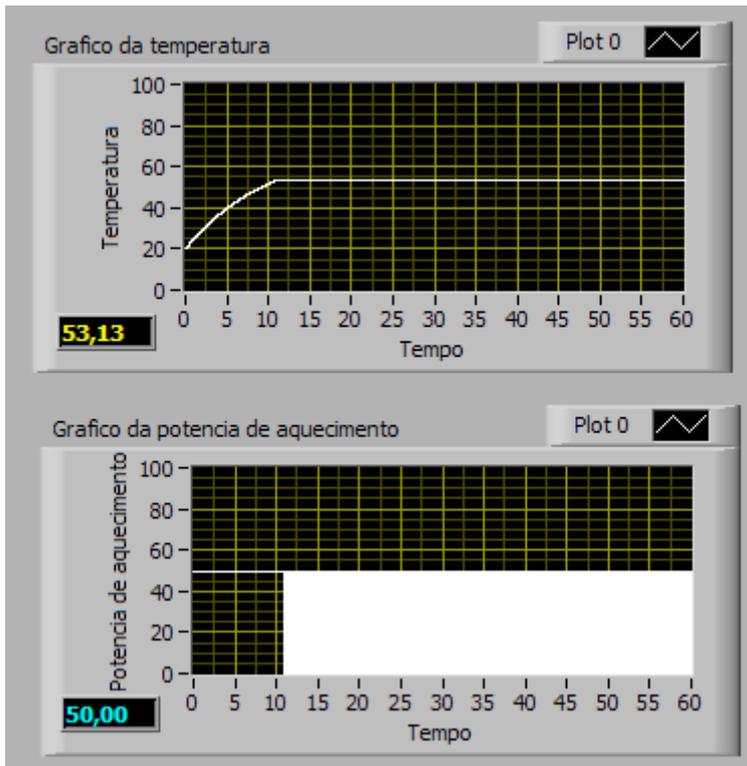



Figura 37 – Controlo de temperatura em malha fechada (On/Off)

Como se pode analisar graficamente (Figura 37) o valor da temperatura vai aumentar até atingir o valor de saída do método de integração. Após a temperatura do tanque estar no nível desejado, visualiza-se no gráfico uma oscilação, isto ocorre para que o valor desejado se mantenha constante.

Nas figuras 38 e 39 estão as respostas do sistema para o algoritmo PID de posição e PID de velocidade.

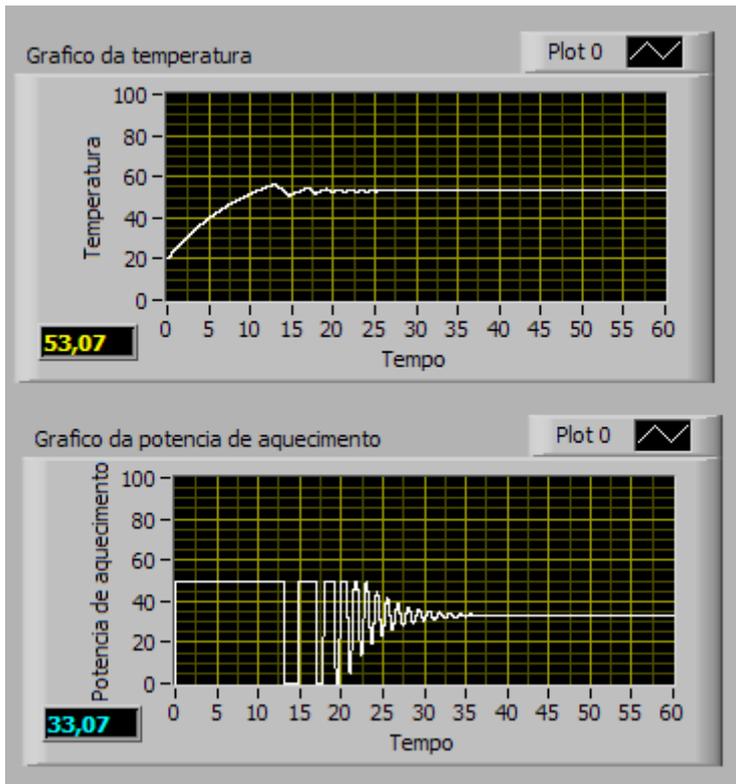



Figura 38 - Controlo de temperatura em malha fechada (PID de posição)

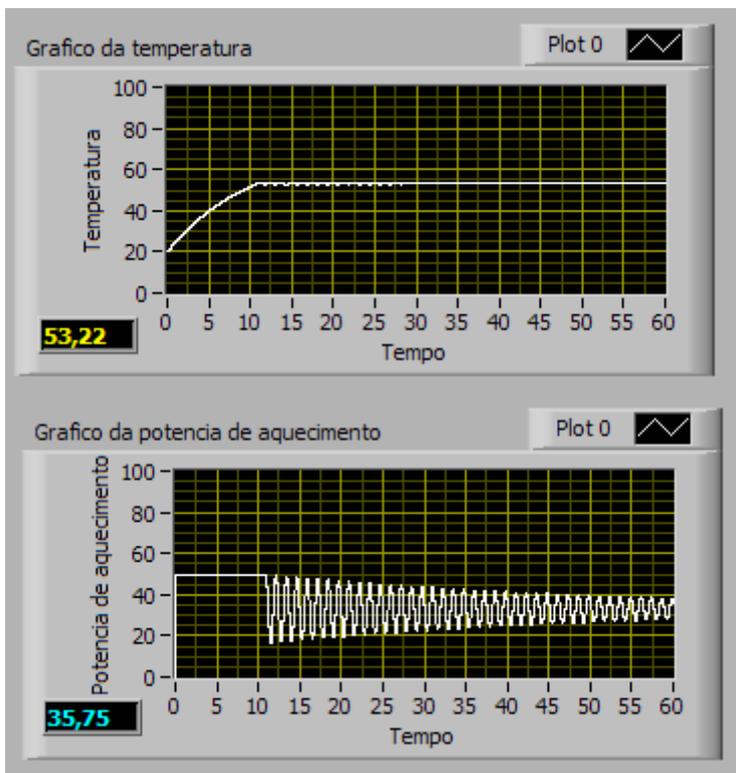



Figura 39 - Controlo de temperatura em malha fechada (PID de velocidade)

Através da análise dos gráficos para controlo de temperatura em malha fechada pode-se verificar que as respostas do PID. Para o PID de velocidade o tempo de estabelecimento

é menor que o do algoritmo de posição, enquanto que o controlo On/Off é mais rápido. Para o On/Off o tempo dispendido é inferior a 12,5 unidades de tempo, e para os controladores PID é superior a 12,5 unidades de tempo. Graficamente também se pode visualizar que a potência de aquecimento para o On/Off é sempre constante (0 ou 50), para os PID vai variando, isto é, inicialmente o valor da potência é elevado e depois vai diminuindo até atingir o valor desejado.

5. Conclusões e Perspectivas futuras

Este trabalho foi desenvolvido com a finalidade de simular o funcionamento de alguns dos processos comuns da indústria, aquecimento de líquidos e controlo de nível. Para tal partiu-se de um kit didáctico que possui estas funcionalidades, o Process Rig. Para testar diferentes formas de funcionamento foram implementados diferentes algoritmos de controlo e diversos métodos numéricos.

Para se poder visualizar o comportamento dos processos foram definidas as equações diferenciais, de controlo de nível e temperatura. De modo a implementar diversas opções foram desenvolvidos em Labview os diferentes algoritmos e os métodos numéricos. Posteriormente, foi criada uma página Web para se aceder ao simulador remotamente.

Os algoritmos de controlo, On/Off e PID foram implementados com sucesso, No PID foram utilizados o PID discreto de posição e velocidade. Com o controlo On/Off tem-se um controlo mais grosseiro. Ao contrário, o PID ajusta-se ao processo e varia conforme o necessário. Neste processo a diferença entre estes dois algoritmos de controlo não é muito visível, uma vez que, quando são utilizados eles são apenas para controlar uma variável de entrada de um processo, o fluxo ou a potência de aquecimento.

Com a utilização do controlo em malha aberta e fechada pode-se concluir, que para um melhor controlo tem-se de utilizar a malha fechada, pois com a malha aberta não se tem um controlo exacto de um processo.

Nos métodos numéricos pode-se concluir que, quantos mais passos intermédios tiver entre passos, mais correcta será a resposta. Ou seja, o Euler é o mais básico e menos preciso, sendo que o mais rigoroso será o Runge-Kutta Fehlberg.

Como perspectivas futuras prevê-se uma optimização deste simulador desenvolvido, introduzindo mais funcionalidades, como por exemplo o controlo de fluxo. Também se podem utilizar outros métodos numéricos, Adams Multon, BDF, Cash-Karp, ou outros

métodos de Runge-Kutta. Para além destas, pode-se também implementar outras leis de controlo.

Bibliografia

[1] Manual do Process Rig

[2] http://www.bytronic.net/ (Consultado em 13/10/2007)

[3] Sebenta de controlo de processos, Filomena Soares, 2003-2004, Dep. Electrónica

[4] Applied Numerical Analisys, fifth edition, Curtis F.Gerald, Patrick O.Wheatley

[5] http://www.ni.com/

[6] http://nautilus.fis.uc.pt/bl/ (Consultado em 6/09/2007)

[7] http://www.ece.ndsu.nodak.edu/~glower/software/simulations/ball.zip

[8] http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3139/tde-30052006-224625/

[9] Fernandes, E.M.G.P., Computação Numérica, 2ª Edição,Universidade do Minho, 1997

[10] http://controlo-processos.dei.uminho.pt/~

[11] http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/

[12] http://www.mspc.eng.br/fldetc/pid1.asp#contr_pid

[13] http://orion.ipt.pt/~anacris/ci_1/pdf/aula3.pdf

[14] http://ltodi.est.ips.pt/smarques/CS/Pid.pdf

[15] Ogata, Modern Control Engineering, Prentice Hall, 1990

[16] http://www.fe.up.pt/

[17] http://ensino.univates.br/

[18] http://wwwp.fc.unesp.br/

[19] http://www.geoma.lncc.br/

[20] http://robotics.dem.uc.pt/

[21] http://www2.mec.ua.pt/

[22] http://repositorio.up.pt/

[23] Leslie Balmer, Signals and systems, Prentice Hall, 1991

[24] Garrido, Paulo Apontamentos da cadeira de controlo automático I e II

[25] Haykin, Simon, Communication Systems, Jonh Wiley and Sons 1983

Anexos

Para ficar menos pesado o diagrama de blocos do simulador foram criados Virtual Instruments, de modo a reduzir esse diagrama.

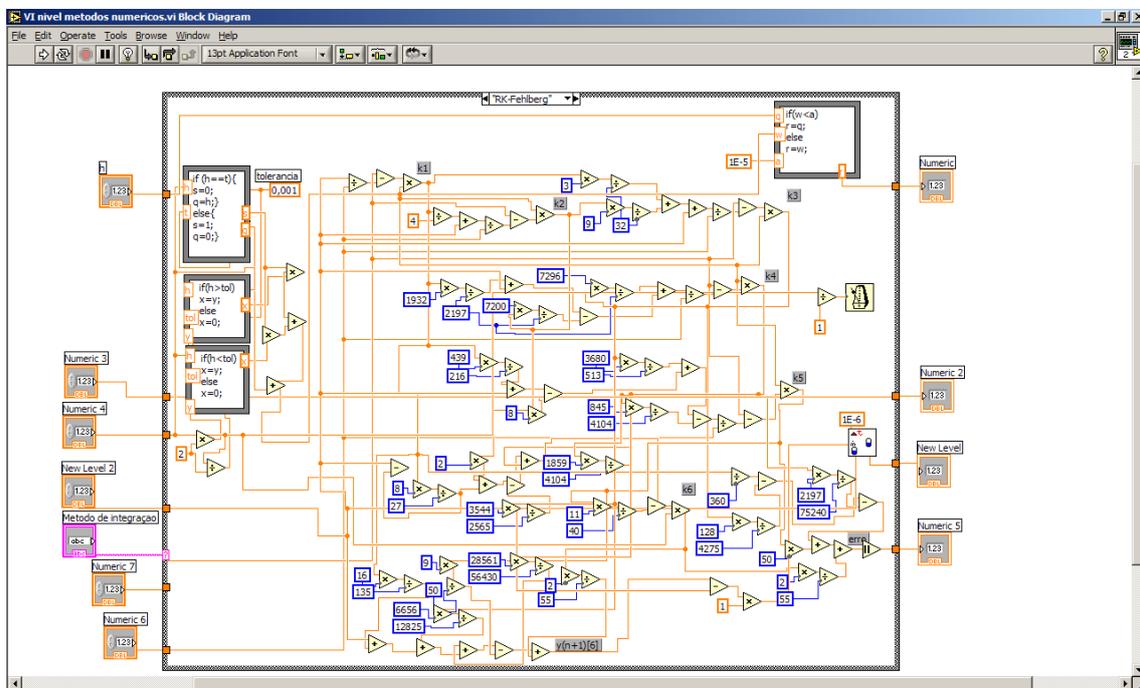



Figura 40 – VI dos métodos numéricos para nível

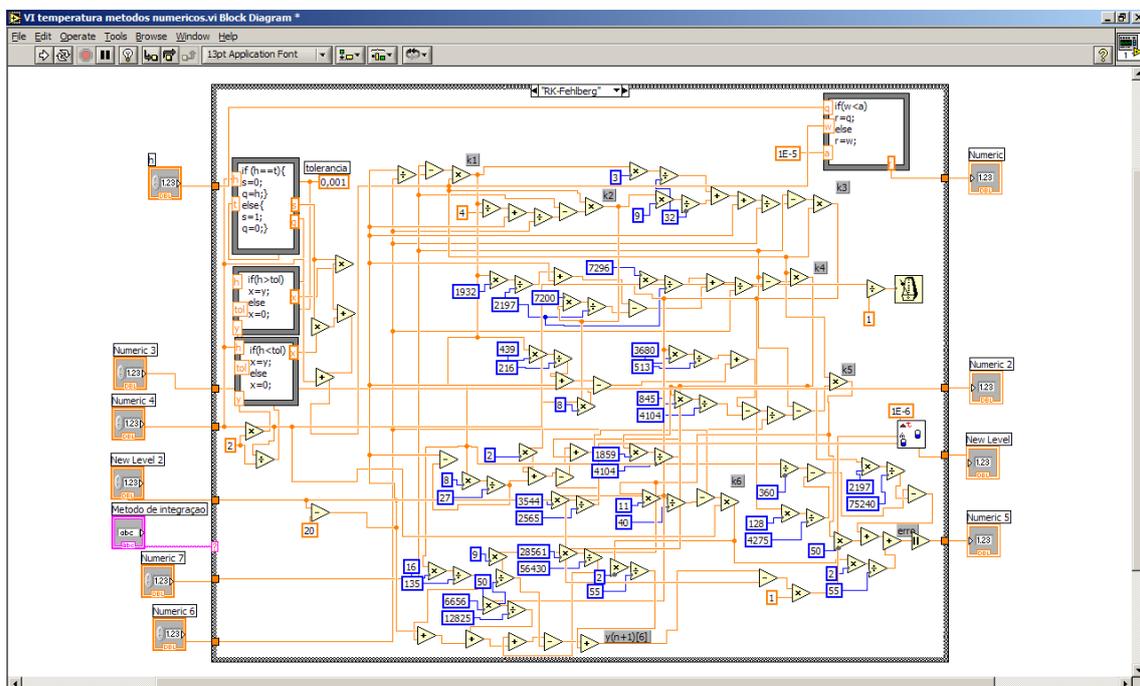
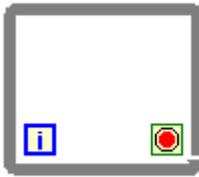
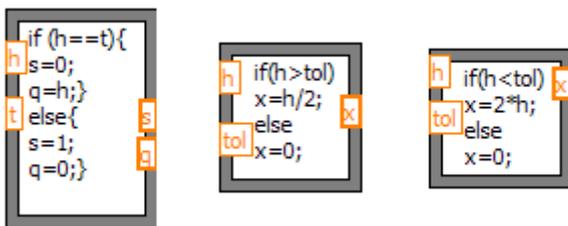



Figura 41 – VI dos métodos numéricos para temperatura

A principal diferença nestes VI´s é que no controlo de temperatura a variação da temperatura é a diferença entre a temperatura no reservatório e a ambiente. Deste modo em todos os métodos está presente uma diferença entre esses valores para o controlo de temperatura.

Nos métodos de Euler e Runge-Kutta de 4ª ordem o valor de *h* (passo de integração) é sempre constante, mas para o método Runge-Kutta Fehlberg o passo é variável, para tal foi necessário implementar um ciclo while loop:

Com este bloco os valores vão sendo sempre actualizados. De modo a variar os valores de *h* foram implementados estes blocos de programação:

Através destes blocos o valor de *h* vai ser alterado, isto é, se o *h* for igual ao valor de tolerância mantém-se, caso seja maior é dividido por 2, caso seja menor é multiplicado por 2.

Funcionamento detalhado do programa:

Malha Aberta

Controlo de nível

O funcionamento do sistema para o controlo de nível de líquido no reservatório tem de obedecer a várias considerações. As duas válvulas (entrada e saída automática estão sempre ligadas), a variação do nível de água vai variar de acordo com a equação 19. Como se considera a área constante, a variação só vai depender da resistência da válvula e do fluxo de entrada. Se o tanque estiver no máximo e o fluxo de saída continuar maior

que o de entrada, a água começa a sair pela saída de emergência e aparece uma mensagem de erro. Para além disto pode-se escolher o método de integração. O diagrama de blocos deste sistema está representado na Figura 42.

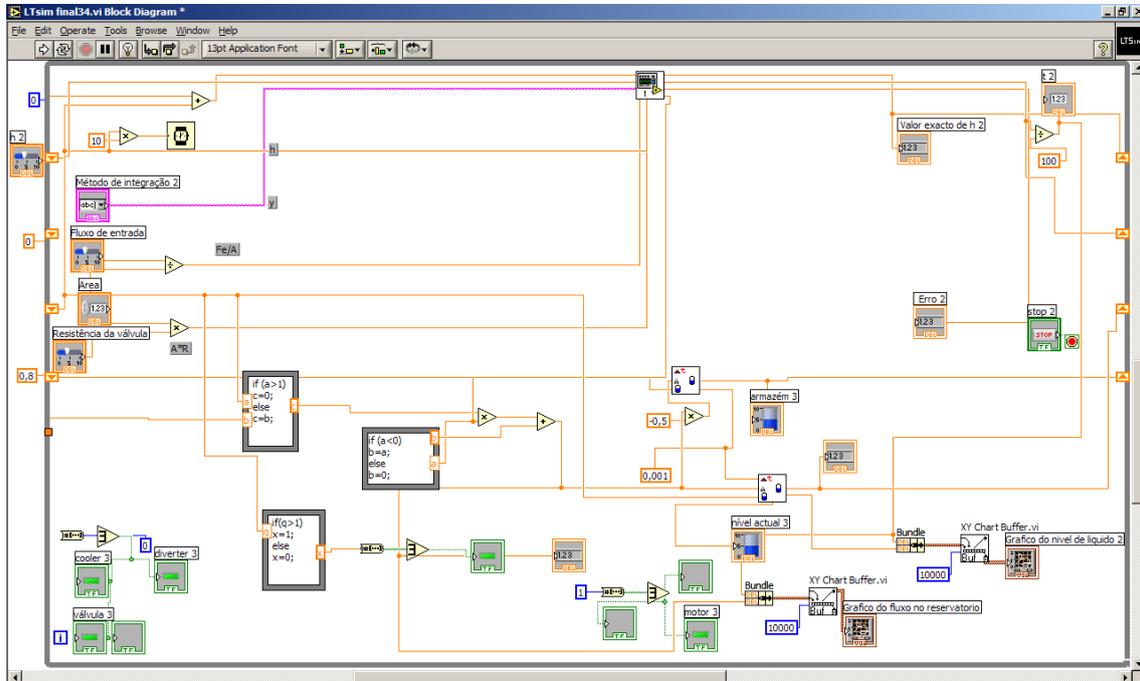
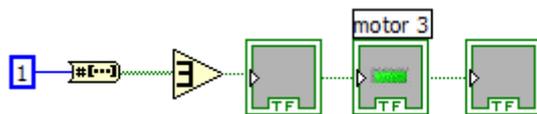
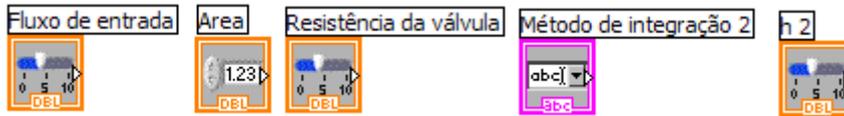
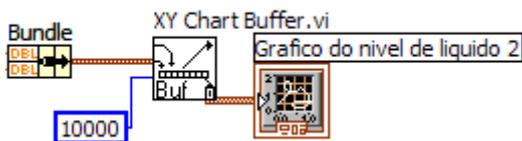
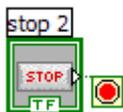



Figura 42 - Diagrama de blocos do controlo de nível em malha aberta

Para fazer a variação do nível do tanque utiliza-se este bloco, que liga directamente ao nível actual do reservatório. Este bloco tem três entradas, *t*, que é o tempo que demora a realizar uma vez este processo, m, que é o fluxo de entrada e 🔋, que é o valor anterior do reservatório.

Como as válvulas vão estar sempre abertas, assim como o motor, não vão mudar de valor (sempre 1), transformando este número num array que activa os componentes.

Estes cinco blocos são as variáveis do controlo de nível em malha aberta, o fluxo de entrada, área e resistência da válvula, estão presentes na equação diferencial do processo. O método de integração define qual o método escolhido, o *h* determina o tamanho dos passos.

Para registar a evolução gráfica é necessário um gráfico que tenha duas entradas, neste caso uma para o nível e outra para o tempo.

Este bloco faz com que pare a simulação.

Caso o caudal de água seja maior na entrada do que na saída, tem de se diminuir o fluxo de entrada ou diminuir a resistência da válvula, para tal aparece uma mensagem de alerta a avisar que a agua esta a sair pela válvula de emergência.

Controlo de temperatura

O controlo de temperatura em malha aberta só e feito se o tanque estiver cheio (isto deve-se a uma recomendação do Process Rig).

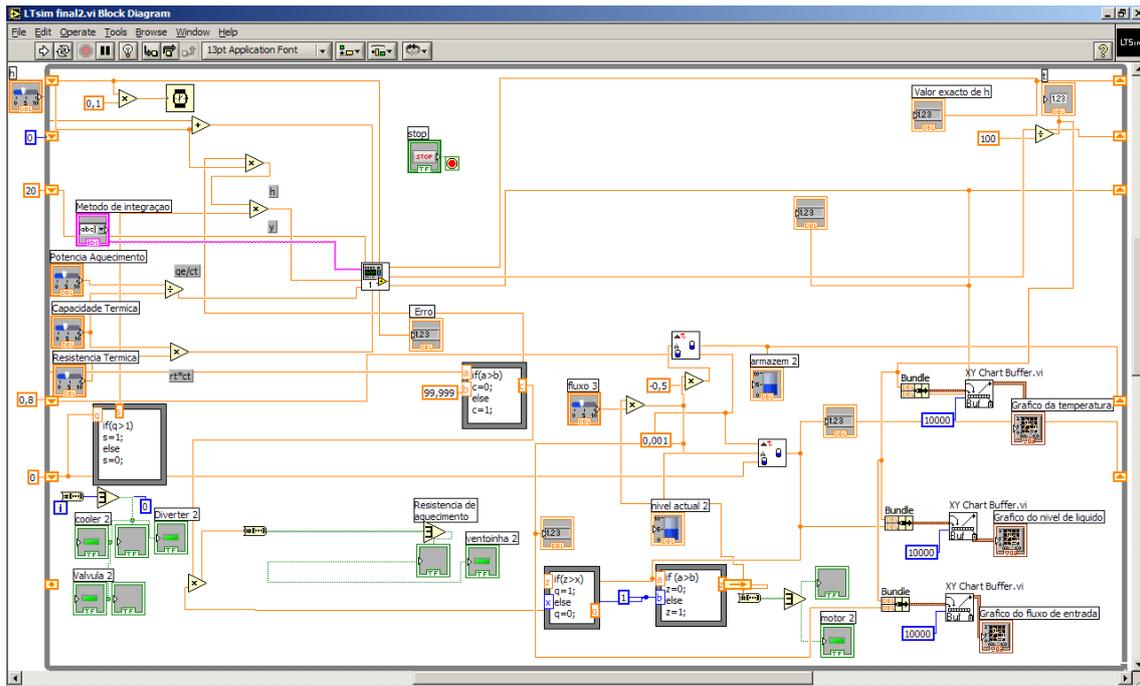



Figura 43 – Diagrama de blocos do controlo de temperatura em malha aberta

Estes blocos representam as variáveis deste processo, que são a resistência térmica, a capacidade térmica, a potência de aquecimento, o método de integração e o passo de integração (*h*).

Malha Fechada

Na malha fechada vai-se ter a introdução dos algoritmos de controlo, On/Off, PID de velocidade e PID de posição.

Controlo de nível

No controlo de nível em malha fechada, as principais diferenças são que a entrada varia conforme a entrada (realimentação) e por isso vai fazer as variações de um modo mais eficaz. Os algoritmos de controlo neste caso vão ser para utilizados para controlar o fluxo.

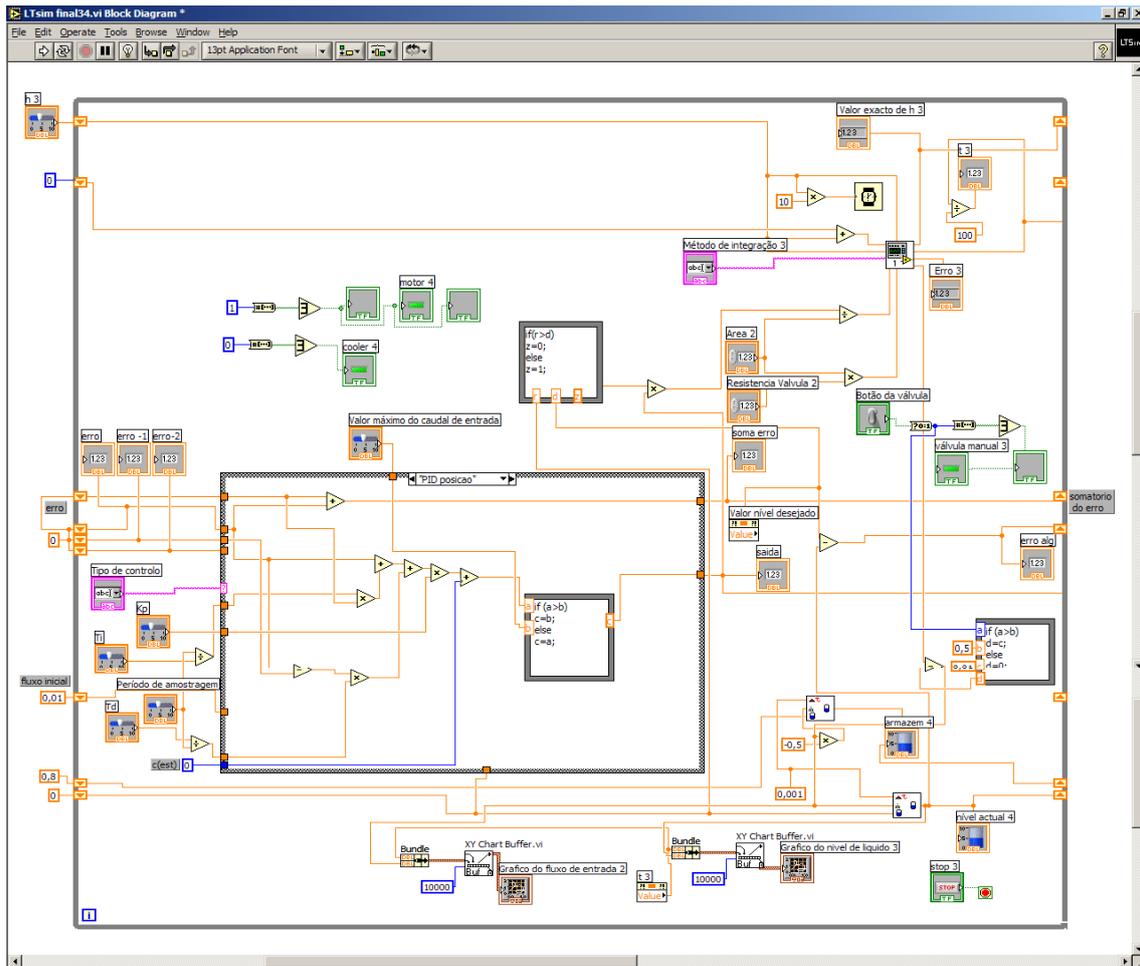



Figura 44 – Diagrama de blocos do controlo de nível em malha fechada

As variáveis mais importantes para este processo são o período de amostragem, Kp, Ti e Td e o tipo de controlo são relativas aos algoritmos. O valor de nível desejado, e valor máximo de caudal de entrada servem para o controlo do restante processo.

Controlo de temperatura

No controlo de temperatura os algoritmos de controlo vão ser utilizados para controlar a potência de aquecimento. Quando a temperatura desejada for atingida a resistência de aquecimento irá ser desligada. Para este caso também o tanque irá ter que estar cheio.

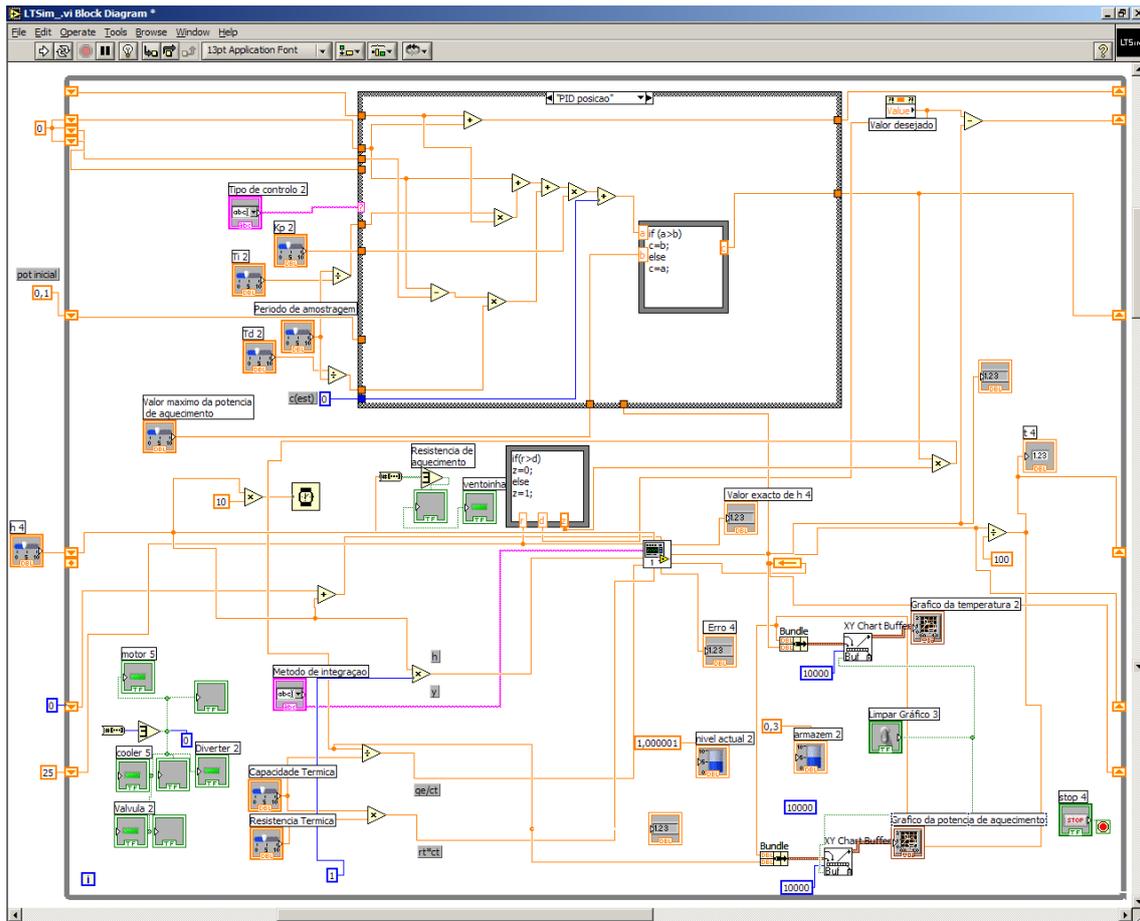
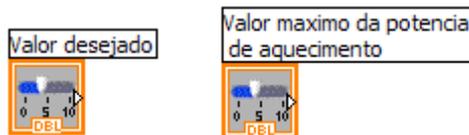
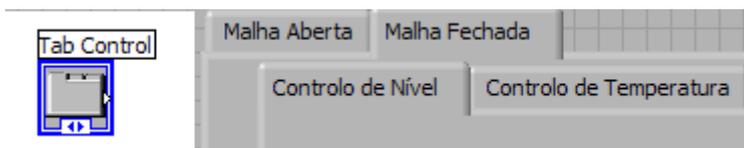
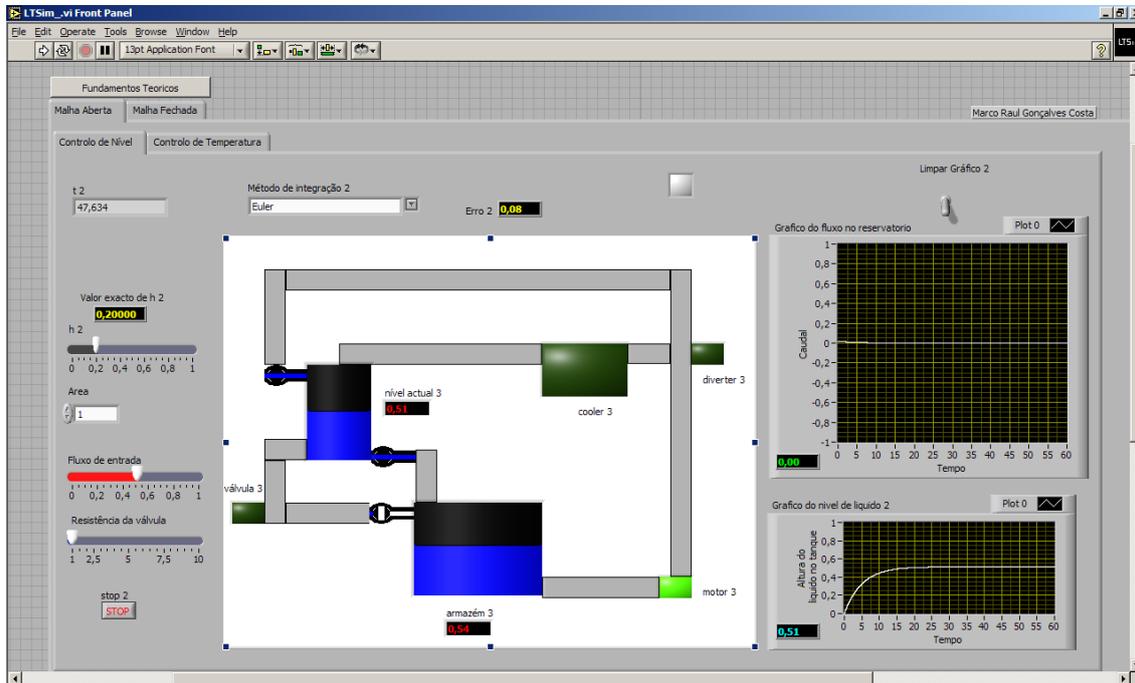
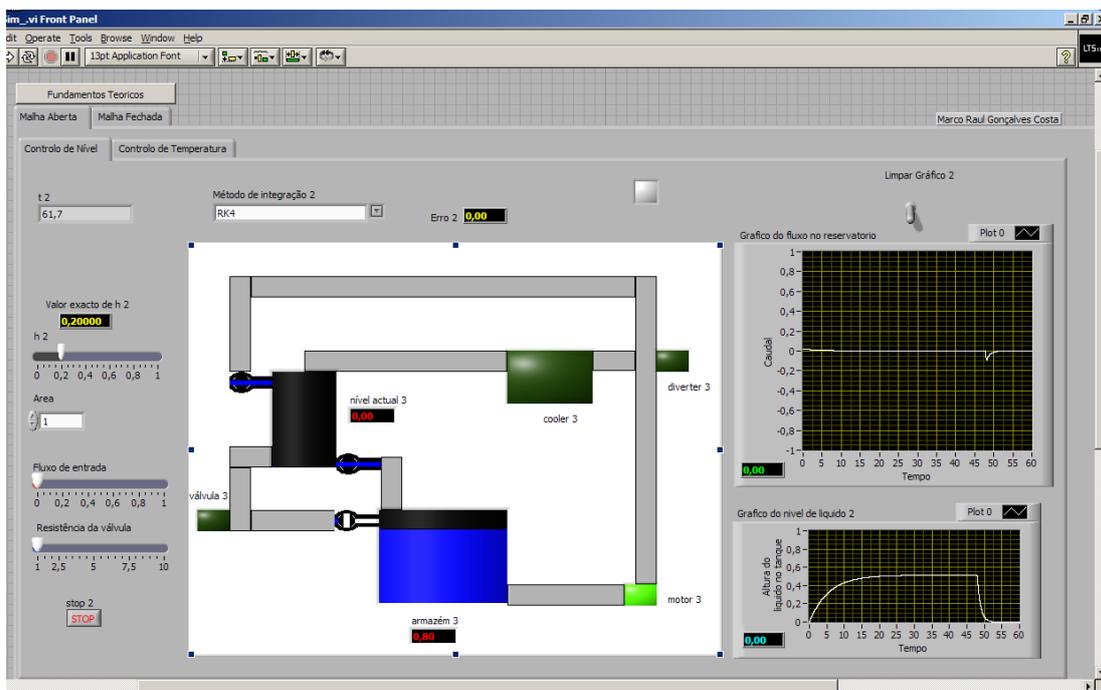



Figura 45 – Controlo de temperatura em malha fechada

Estas variáveis servem para determinar a temperatura desejada e o valor máximo da potência.

Para se fazer a selecção dos diversos modos de funcionamento do simulador foram utilizados blocos “Tab Control”, com estes blocos pode-se escolher qual dos modos (malha aberta-controlo de nível, malha aberta-controlo de temperatura, malha fechada-controlo de nível ou malha fechada-controlo de temperatura).

Este bloco funciona da seguinte forma, o que estiver seleccionado no Front Panel é o que irá estar em funcionamento no diagrama de blocos.

Nestas duas figuras abaixo pode-se visualizar a resposta do sistema em malha aberta para controlo de nível. Na primeira figura os valores das variáveis são constantes, na segunda vão ser modificados de modo a se poder ver qual a resposta do sistema.

O valor inicial do fluxo é igual ao da imagem anterior até as 47,5 unidades de tempo (aproximadamente), a partir daí esse valor é reduzido para zero.

Nas figuras abaixo vê-se a resposta do sistema de controlo de nível em malha fechada para PID de velocidade e PID de posição.